

## EFEK IMPURITAS BORON PADA *KERNEL* BAHAN BAKAR HTGR *PEBBLE BED*

Hery Adrial

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN

### ABSTRAK

**EFEK IMPURITAS BORON PADA *KERNEL* BAHAN BAKAR HTGR *PEBBLE BED*.** Boron merupakan material yang sangat efektif berfungsi menyerap neutron. Adanya impuritas boron pada teras bahan bakar, khususnya bahan bakar disinyalir akan dapat mempengaruhi performa sifat-sifat neutronik maupun keselamatan kritikalitas reaktor. Oleh karena itu penelitian tentang efek impuritas boron pada bahan bakar *pebble* penting dilakukan, agar dapat diketahui pengaruh impuritas terhadap kritikalitas teras HTGR. Tahap awal penelitian, dilakukan validasi program MCNP6.1 yang dibuat dengan cara membandingkan hasil tinggi teras kritis awal reaktor HTGR dengan tinggi kritis awal HTR-10 secara eksperimen maupun berdasarkan program VSOP kemudian dilakukan perhitungan kritikalitas terhadap impuritas boron pada *kernel pebble*. Hasil yang dicapai menunjukkan program yang dibuat mempunyai tingkat keakuratan yang sangat baik yaitu 1,58 % terhadap hasil eksperimen. Hasil perhitungan kritikalitas terhadap impuritas boron menunjukkan tidak adanya pengaruh akibat impuritas boron pada teras awal.

**Kata kunci:** impuritas boron, MCNP6.1, kritikalitas, HTGR, *pebble bed*

### ABSTRACT

**BORON IMPURITY EFFECTS ON FUEL KERNELS OF *PEBBLE BED* HTGR.** Boron is an extremely effective material to absorb neutrons. The presence of boron impurity on the fuel core, especially on the fuels will presumably affect the performance of neutronik properties and reactor criticality safety. Therefore, a research on the effects of boron impurity on *pebble bed* fuel is important, in order to know the influence of impurities on the HTGR core criticality. In the initial stage of the study, a validation using MCNP6.1 code was performed by comparing the results of the initial height of HTGR critical core with the initial height of HTR-10 critical core obtained from experiment and based on VSOP code before calculating the criticality of the boron impurity in the *pebble bed kernel*. The results obtained show that the program has made a very good level of accuracy of 1.58 % compared with the experimental results. The result of the criticality calculation of the boron impurity showed no effect from the boron impurity in the HTGR initial core.

**Keywords:** boron impurity, MCNP6.1, criticality, HTGR, *pebble bed*

## PENDAHULUAN

Reaktor jenis *pebble bed* adalah jenis reaktor HTGR bertemperatur tinggi dengan sistem pendingin memakai fluida helium. Bahan bakar dan moderator reaktor ini berbentuk *pebble* (bola). Jenis reaktor ini merupakan salah satu model reaktor generasi IV yang mempunyai sifat keselamatan inherent safety (keselamatan melekat) yang bersifat pasif. Sifat keselamatan ini muncul dikarenakan pada reaktor HTGR *pebble bed* menggunakan jenis material yang digunakan untuk konstruksi dan bahan bakar serta moderator reaktor didominasi oleh grafit, yang dapat berfungsi untuk menyerap neutron sehingga dapat membuat teras reaktor selalu dalam keadaan reaktivitas negatif. Dengan demikian teras dan bahan bakar reaktor tidak akan pernah meleleh walau terjadi kecelakaan<sup>[1]</sup>

Reaktor HTGR *pebble* mempunyai bahan bakar dan moderator berbentuk *pebble* (bola). Bola bola bahan bakar terdiri dari ribuan bola *kernel* yang dilapisi oleh lapisan partikel TRISO (TRI structure ISO material) yang terdispersi pada matrik grafit. Setiap *kernel* dapat berisi uranium dioksida ( $UO_2$ ). Sedang lapisan TRISO terdiri dari 4 lapisan. Lapisan pertama merupakan lapisan buffer karbon berpori yang berfungsi sebagai penampung gas hasil fisi. Lapisan kedua merupakan lapisan pirolitik karbon bagian dalam (IPyC). Lapisan ketiga merupakan lapisan silikon karbida (SiC), sedangkan lapisan ke empat merupakan lapisan pirolitik karbon bagian luar (OPyC).

Dalam kenyataannya sangat sulit untuk mendapatkan uranium dioksida ( $UO_2$ ) murni

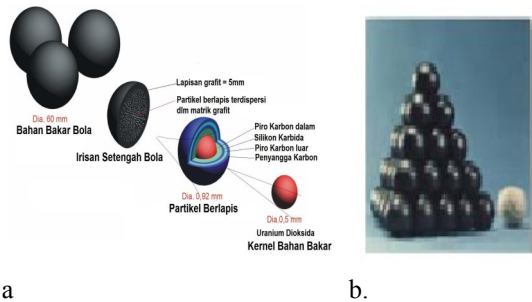
yang mengisi *kernel*. Uranium dioksida ( $UO_2$ ) yang mengisi *kernel* selalu mempunyai material impuritas (pengotor) berupa material boron dengan berbagai tingkat konsentrasi. Material boron merupakan salah satu material yang berfungsi untuk menyerap neutron sehingga keberadaan material boron pada teras reaktor sangat mempengaruhi sifat netronik reaktor. Oleh karena itu penelitian pengaruh impuritas boron pada *kernel* bahan bakar *pebble* sangat diperlukan.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan paket program MCNP6.1, bertujuan untuk mengetahui pengaruh tingkat konsentrasi pengotoran boron pada *kernel* bahan bakar *pebble bed* terhadap kriticalitas reaktor.

## DESKRIPSI HTGR

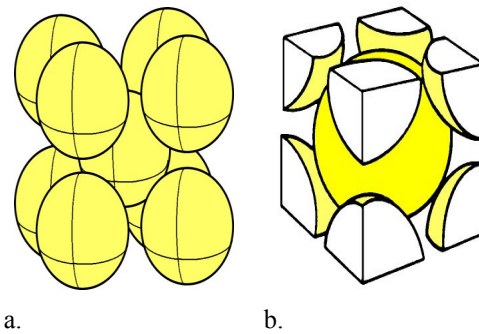
HTGR *pebble* merupakan reaktor temperatur tinggi yang menggunakan gas helium sebagai media pendingin. Reaktor ini didesain untuk dapat beroperasi pada temperatur tinggi. Temperatur pendingin masuk sekitar 250 °C dan temperatur pendingin keluar dari teras reaktor sekitar 700 °C. Bahan bakar HTGR berbentuk *pebble* (bola pejal) dengan radius 3 cm. Pada setiap *pebble* terdapat zona *pebble* berdiameter 2,5 cm yang terbuat dari matrik grafit yang di dalamnya tersebar sebanyak 8335 *kernel*  $UO_2$  dengan tingkat pengkayaan 17 %. *Kernel* dilapisi dengan lapisan TRISO. Pada setiap *pebble* bahan bakar, *kernel* tersebut tersusun dalam bentuk kisi Simple Cubic (SC). Matrik grafit kemudian dilapisi material grafit sete-

bal 0,5 cm, sehingga akan terbentuk *pebble* bahan bakar dengan radius 3,0 cm. Sedangkan moderator HTGR pebbel berbentuk bola pejal yang terbuat dari material grafit dengan diameter 3 cm. Bentuk bahan bakar dan moderator dapat dilihat pada Gambar 1.



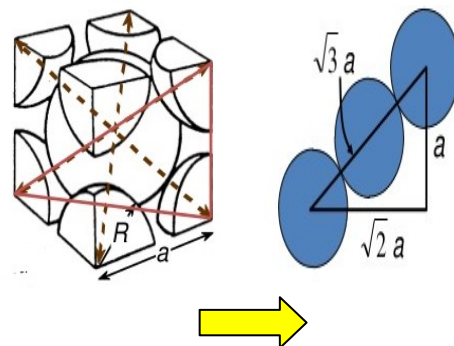
Gambar 1. a. Bahan bakar *pebble* b. Bola-bola moderator

Pada teras reaktor untuk kondisi teras awal, *pebble* bahan bakar dan *pebble* moderator bercampur dengan perbandingan jumlah *pebble* bahan bakar dan moderator di dalam teras adalah 53 : 47. Tinggi teras aktif untuk kondisi teras penuh adalah 197 cm dan diameter 90 cm. Sedangkan pada konus teras yang mempunyai ketinggian 37,5 cm serta diameter bawah 25 cm, seluruhnya terisi oleh *pebble* moderator. Campuran *pebble* bahan bakar dan moderator diasumsikan tersusun dalam bentuk kisi BCC (*Body Centered Cubic*) seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. a. Susunan bola BCC b. Kisi BCC

Dengan mengikuti bentuk kisi BCC maka perlu diperhitungkan nilai-nilai panjang kisi ( $a$ ) dan *packing factor* ( $Pf$ ) yang akan dimasukkan sebagai parameter input pada program MCNP. Perhitungan panjang kisi ( $a$ ) maupun *packing factor* dilakukan dengan melakukan pemodelan seperti gambar 3



Gambar 3. Modeling kisi BCC untuk menghitung panjang kisi dan *packing factor*

Dengan menggunakan model BCC seperti yang ditunjukkan Gambar 3, maka akan didapat hubungan panjang kisi terhadap radius *pebble* serta didapat pula hubungan *packing* faktor terhadap panjang kisi. Selain itu, panjang kisi juga mempunyai hubungan dengan jumlah *kernel* dan radius zona bahan bakar di dalam *pebble*<sup>[2]</sup>

$$\text{Panjang kisi (a)} = \frac{4R}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Panjang kisi (a)} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_{\text{zona}}^3}{N} \dots\dots\dots(2)$$

$$(Pf) = \frac{2\left(\frac{4}{3}\right)\pi\left(\frac{a\sqrt{3}}{4}\right)^3}{a^3} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

- a = panjang kisi  
 R = radius *pebble*  
 $r_{\text{zona}}$  = Radius zona bahan bakar pada *pebble*  
 N = Jumlah *pebble* pada bahan *kernel*

Untuk mencapai teras setimbang, campuran *pebble* bahan bakar dan *pebble* moderator perlahan-lahan dikurangi jumlah moderatornya sehingga seluruh teras terisi oleh *pebble* bahan bakar .

Seluruh reflektor pada reaktor HTGR *pebble* terbuat dari bahan grafit. Reflektor berada di atas, bawah dan mengelilingi teras secara radial dengan ketebalan 100 cm. Pada bagian atas selain berfungsi sebagai reflektor , juga berfungsi sebagai penutup teras dengan ketebalan 9,7 cm. Diantara teras aktif and reflektor atas terdapat ruang yang berisi void setebal 41.698 cm.

Reaktor diberi barel yang terbuat dari

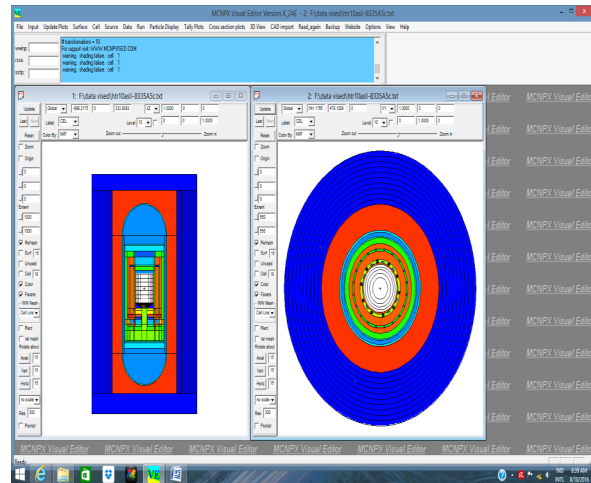
material Stainless Steel (SS) setebal 5 cm kemudian dilapisi pressure vessel (tangki tekan) yang juga terbuat dari Stainless Steel (SS) dengan ketebalan 8 cm. Pada daerah reflektor terdapat lokasi 10 lubang batang kendali, 7 lubang bola absorber kecil dan 3 lubang irradiasi serta 20 lubang pendingin helium, Setelah tanki tekan terdapat ruang RCCS (*Reactor Cavity Cooling System*) yang berfungsi untuk menurunkan panas yang terjadi pada reaktor secara natural dengan ketebalan 100 cm kemudian reaktor dilapisi biological shield (perisai biologis) yang terbuat dari material beton reguler setebal 200 cm dengan densitas 2,3 gram/cm<sup>3</sup>.

Batang kendali didesain dalam bentuk silinder kosentris (silinder berrongga) dengan panjang batang kendali 264,7 cm. Radius dalam sebesar 27,5 cm diisi oleh gas pendingin helium sedangkan radius luar kelongsong sebesar 3,25 cm. Batang kendali dilapisi kelongsong yang terbuat dari material SS dengan ketebalan 0,2 cm Pada batang kendali terdapat material penyerap neutron terbuat dari material B<sub>4</sub>C yang mempunyai densitas sebesar 1,7 gram/cc dan terbagi dalam 5 segmen piringan B<sub>4</sub>C dengan masing-masing segmen piringan B<sub>4</sub>C mempunyai panjang 48,7 cm.

Bola absorber kecil terbuat dari material grafit yang ditambahkan material B<sub>4</sub>C 25 % dari berat dengan diameter 5 mm dan densitas 1,9 gram/cc serta faktor poritas sebesar 0,39. Pada HTGR *pebble*, bola absorber berfungsi sebagai sistem shutdown kedua. Jika pada kondisi kecelakaan terjadi batang ken-

dali *stuck rod* sehingga batang kendali tidak dapat dimasukkan ke dalam saluran yang tersedia pada teras reaktor, maka bola-bola kecil absorber akan segera masuk ke dalam saluran bola absorber untuk mengantisipasi keadaan tersebut<sup>[3-7]</sup>. Jumlah bola absorber kecil dalam setiap saluran adalah  $2,7 \times 10^5$ .

Secara umum rincian deskripsi HTGR *pebble bed*. Untuk memperjelas gambaran tentang konstruksi reaktor HTGR *pebble bed*, maka hasil modeling konstruksi yang menggunakan paket program VISED dapat ditampilkan pada Gambar 4. Sedangkan parameter-parameter konstruksi yang digunakan diuraikan pada Tabel 1



Gambar 4. Konstruksi reaktor HTGR *pebble bed* dilihat dari samping dan atas

Tabel 1. Parameter Desain konstruksi HTGR 10 MWt<sup>[8]</sup>

| Spesifikasi       |  |                       |                   |
|-------------------|--|-----------------------|-------------------|
|                   | Parameter  | Nilai                 | satuan            |
| Teras             | Tinggi   | 1,97                  | m                 |
|                   | Diameter   | 1,8                   | m                 |
|                   | Volume   | 5                     | m <sup>3</sup>    |
| Struktur          |  |                       |                   |
|                   | Parameter  | Value                 | Unit              |
| Reaktor           | Densitas Reflektor grafit  | 1,76                  | g/cm <sup>3</sup> |
|                   | Impuriti kandungan boron pada reflektor grafit   | 4,8366                | ppm               |
|                   | Densitas bata karbon ( <i>carbon brick</i> ) yang mengandung Boron (termasuk B <sub>4</sub> C) | 1,59                  | g/cm <sup>3</sup> |
|                   | Rasio berat B <sub>4</sub> C pada blok bata karbon   | 5                     | %                 |
| Pendingin Helium  | Jumlah kanal pendingin menuju teras  | 20                    | g/cm <sup>3</sup> |
|                   | Radius saluran   | 4                     | cm                |
|                   | Tekanan He   | 5                     | MPa               |
|                   | Aliran massa pendingin   | 120                   | kg/s              |
|                   | Densitas pendingin He pada 273,16 K, 10 <sup>5</sup> Pa  | 1,78×10 <sup>-4</sup> | g/cm <sup>3</sup> |
| Saluran Irradiasi | Jumlah saluran irradiasi   | 3                     | unit              |
|                   | Radius saluran   | 6,5                   | cm                |
|                   | Posisi saluran   | Di dalam reflektor    | -                 |
| Batang kendali    | Jumlah batang kendali  | 10                    | unit              |
|                   | Radius kanal per unit batang kendali   | 6,5                   | cm                |
|                   | Posisi kanal radial dan pusat  | 95 - 108              | cm                |
|                   | Tinggi batang kendali  | 280,568               | cm                |
|                   | Ketebalan kelongsong luar dan dalam SS   | 0,2                   | cm                |
|                   | Ketebalan gap antara kelongsong dan B <sub>4</sub> C   | 0,05                  | cm                |
|                   | Diameter B <sub>4</sub> C  | 3,25                  | cm                |
| Small Absorber    | Jumlah   | 7                     | unit              |
|                   | Posisi   | Didalam reflektor     |                   |

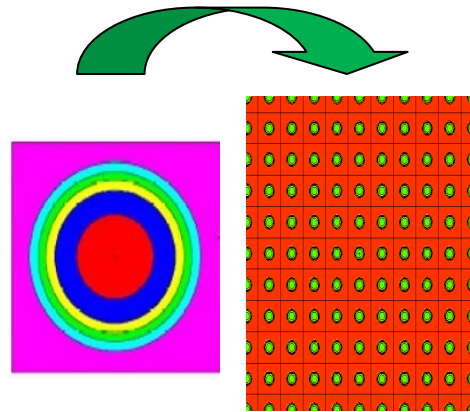
## METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan faktor multiplikasi dengan variasi konsentrasi impuritas dari 0 ppm sampai dengan 10 ppm pada *kernel* bahan bakar untuk tingkat pengayaan  $UO_2$  sebesar 17 %. Dalam perhitungan kritikalitas digunakan paket program MCNP6.1 yang telah dilengkapi pustaka data nuklir ENDF/B-VII.1<sup>[9]</sup>.

Pada tahap awal, penelitian ini akan dimulai dengan melakukan modeling konstruksi reaktor HTGR *pebble bed* lengkap dengan perangkat-perangkatnya seperti : saluran pendingin, batang kendali, bola absorber,dll.

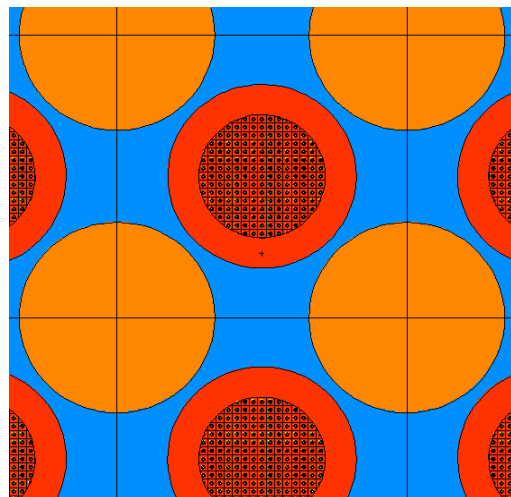
Teras reaktor dalam keadaan kondisi teras kosong (teras belum terisi) dengan menggunakan paket program VISED sesuai dengan parameter-parameter yang tersedia pada Tabel 1, sedangkan hasil pemodelan telah tersaji pada Gambar 4. Selanjutnya dilakukan pemodelan *kernel* bahan bakar yang dilapisi oleh 4 lapisan TRISO. Selanjutnya dilakukan pemodelan *kernel* yang tersebar di dalam zona bahan bakar yang mempunyai radius 2,5 cm. Pemodelan sebaran *kernel* yang telah dilapisi TRISO dimodelkan dalam bentuk sebaran kisi-kisi Simple Cubic (SC) kemudian dilanjutkan dengan membungkus bahan bakar dengan lapisan grfit dengan ketebalan 0,5 cm.

Ilustrasi sebaran *kernel* pada *pebble* bahan bakar *kernel* dalam bentuk kisi SC disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Visualisasi *kernel* berlapis TRISO dalam bentuk kisi SC pada *pebble* bahan bakar

Tahap berikutnya, membuat model *pebble* bahan bakar yang bercampur dengan *pebble* moderator di dalam teras dengan perbandingan 53 : 47 . Bentuk kisi pencampuran *pebble* bahan bakar dan moderator diasumsikan dengan bentuk kisi BCC <sup>[10,11]</sup>. Hasil pemodelan dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Pemodelan campuran *pebble* bahan bakar dan moderator dalam kisi BCC

Tahap berikutnya dilakukan perhitungan-perhitungan kritikalitas teras reaktor untuk mendapatkan tinggi kritis teras HTGR *pebble bed* dengan menggunakan paket program Monte Carlo 6.1 (MCNP6.1), Ketinggian teras campuran bahan bakar dan moderator divarisi dari 80 cm sampai dengan 197 cm. Setelah itu, dilakukan perbandingan dengan hasil dari reaktor lain untuk memvalidasi program MCNP yang dibuat.

Tahap selanjutnya dilakukan perhitungan dentitas atomik impuritas boron yang terdapat pada *kernel* bahan bakar. Kelimpahan boron 10 (B-10) dan boron 11(B-11) pada boron natural adalah 19,9 % dan 80,1 %. Perhitungan-perhitungan dilakukan mulai dari tanpa impuritas boron sampai dengan konsentrasi impuritas boron pada *kernel* UO<sub>2</sub> menjadi 10 ppm. Perhitungan densitas impuritas boron mengikuti persamaan :

$$NB_{10\text{impuritas}} = NB_{10\text{natural}} * NUO_{2\text{total}} \dots\dots (4)$$

$$NB_{11\text{impuritas}} = NB_{11\text{natural}} * NUO_{2\text{total}} \dots\dots (5)$$

Dimana :

$NB_{10\text{impuritas}}$  = Densitas atomik impuritas B-10

$NB_{11\text{impuritas}}$  = Densitas atomik impuritas B-11

$NB_{10\text{natural}}$  = Densitas atomik B-10 dalam Boron natural

$NB_{11\text{natural}}$  = Densitas atomik B-11 dalam Boron natural

$NUO_{2\text{total}}$  = Densitas atomik UO<sub>2</sub> total

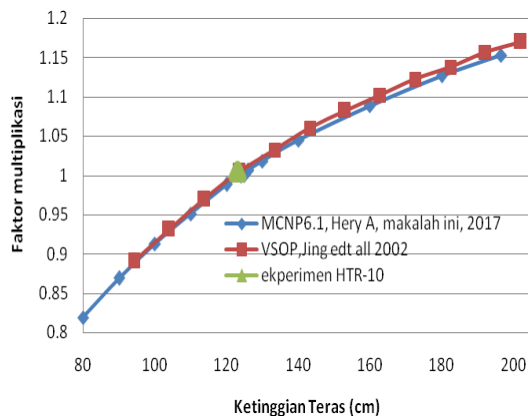
Hasil dari perhitungan densitas atomik impuritas boron tersebut dimasukkan sebagai masukan (input) program MCNP 6.1, pada bagian kartu material. Seluruh perhitungan-perhi-

tungan yang memakai paket program MCNP6.1 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. Angka 1.0 menunjukkan  $k_{\text{eff}}$  awal bernilai 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). Kondisi temperatur yang digunakan adalah 300 K dan pustaka tampang lintang yang digunakan ENDF/B-VI.

## HASIL DAN DISKUSI

Dari hasil perhitungan kritikalitas teras HTGR *pebble bed* untuk mendapat nilai ketinggian kritis awal maka dilakukan perhitungan faktor multiplikasi untuk ketinggian teras 80 cm sampai 197 cm (teras penuh) secara bertahap menggunakan paket program MCNP6.1 Hasil perhitungan yang dilakukan kemudian dibandingkan hasil perhitungan peneliti lain yang menggunakan paket program yang berlainan untuk mevalidasi program MCNP6.1 yang dibuat . Hasil perhitungan dengan MCNP6.1 dan pembandingnya disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Perhitungan kriticalitas teras HTGR pebble bed 10 menggunakan MCNP6.1

Pada Gambar 7, terlihat bahwa hasil perhitungan yang dilakukan dengan menggunakan MCNP6.1 terlihat sangat mendekati hasil perhitungan Jing et al untuk HTR-10, kondisi ini disebabkan reaktor HTGR pebble bed yang digunakan pada penelitian ini mempunyai parameter yang identik dengan HTR-10. Dengan demikian hasil yang didapat semakin meyakinkan bahwa program yang dibuat telah tervalidasi dengan akurat. Dari analisa Gambar 7, dapat pula diketahui tinggi teras kritis awal untuk desain HTGR pebble bed yang dibuat dengan menggunakan paket program MCNP6.1 mencapai ketinggian 125 cm. Desain yang dibuat Jing et al pada tahun 2002 dengan menggunakan paket program VSOP menghasilkan ketinggian teras awal 123,57 cm, sedangkan hasil eksperimen menghasilkan ketinggian kritis awal 123,06 [12-14]. Dengan demikian tingkat keakuratan yang dihasilkan bila dibandingkan hasil eksperimen adalah 1,58 % untuk program yang dibuat dengan MCNP6.1 sedang untuk program VSOP yang dibuat oleh Jing et al mempunyai tingkat keakuratan terhadap eksperimen sebesar

0,38 %. Dengan demikian hasil dari program yang dibuat sudah sangat mendekati hasil eksperimen dan hasil yang dilakukan oleh Jing et al [14]. Hal ini dapat meyakinkan bahwa program yang dibuat sudah cukup baik dan memberikan hasil yang akurat dan semakin meyakinkan untuk mengaplikasikan program yang dibuat untuk penelitian-penelitian lebih lanjut.

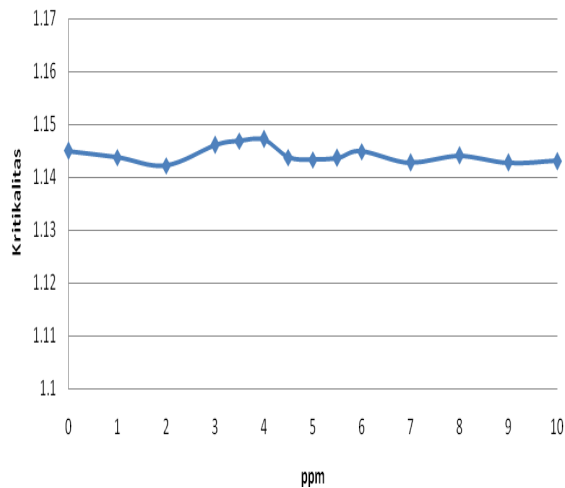
Untuk hasil dari perhitungan densitas impuritas boron pada kernel bahan bakar pebble menggunakan persamaan 4 dan 5 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Densitas imputas boron pada kernel pebble

| PERHITUNGAN DENSITAS BORON DI KERNEL<br>PENGAYAAN 17 % |                       |                         |                         |                         |
|--|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| No   | Impuritas Boron (ppm) | NB-gab                  | NB-10 impuritas         | NB-11 impuritas         |
| 1  | 0,0                   | 0,0                     | 0,0                     | 0,0                     |
| 2  | 2,0                   | $4,647 \times 10^{-22}$ | $9,248 \times 10^{-22}$ | $3,722 \times 10^{-22}$ |
| 3  | 4,0                   | $9,294 \times 10^{-22}$ | $1,850 \times 10^{-21}$ | $7,445 \times 10^{-22}$ |
| 4  | 6,0                   | $1,394 \times 10^{-21}$ | $2,774 \times 10^{-21}$ | $1,117 \times 10^{-21}$ |
| 5  | 8,0                   | $1,859 \times 10^{-21}$ | $3,699 \times 10^{-21}$ | $1,489 \times 10^{-21}$ |
| 6  | 10,0                  | $2,323 \times 10^{-21}$ | $4,624 \times 10^{-21}$ | $1,861 \times 10^{-21}$ |

Dengan menggunakan densitas impuritas boron pada Tabel 2 untuk dimasukkan kedalam input MCNP6.1 maka akan didapat hasil perhitungan pengaruh impuritas konsentrasi boron pada kernel bahan bakar pebble bed dengan menggunakan MCNP6.1 yang disajikan pada Gambar 8.





Gambar 8. Pengaruh impuritas boron pada *kernel pebble bed* terhadap kritikalitas teras

Dari Gambar 8, terlihat bahwa semakin naik jumlah impuritas boron pada *kernel* bahan bakar *pebble* maka tidak banyak mempengaruhi nilai faktor multiplikasi yang dihasilkan. Hal ini disebabkan pada kondisi teras awal, teras reaktor masih dipenuhi oleh moderator *pebble* berfungsi memoderasi neutron dan juga berfungsi sebagai reflektor karena banyak mengandung grafit. Akibatnya pengaruh kenaikan boron menjadi tidak terasa.

## KESIMPULAN

Pembuatan modeling HTGR *pebble bed* dengan menggunakan MCNP6.1 menghasilkan hasil yang cukup baik dengan tingkat keakuratan terhadap eksperimen HTR-10 sebesar 1,58 %. Hal ini menunjukkan bahwa program yang dibuat layak untuk dipakai dan dilanjutkan pada penelitian selanjutnya. Dari hasil perhitungan pengaruh impuritas boron pada *kernel pebble bed* menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi pengotor boron hingga mencapai 10 ppm belum mempengaruhi nilai

faktor multiplikasi yang terjadi pada teras reaktor dengan kondisi teras penuh awal.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Jupiter Sitorus Pane, M.Sc. selaku Kepala Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor (BFTR) – PTKRN BATAN atas saran dan perbaikan, sehingga makalah ini dapat ditulis dengan baik. Demikian Pula kepada Ir. Zuhair, MEng, yang telah menyediakan waktu untuk berdiskusi tentang materi penulisan ini. Dorongan semangat dan bantuan rekan-rekan dari BFTR sangat diharapkan agar tulisan ini semakin bermutu

## DAFTAR PUSTAKA

1. ZUHAIR, SUWOTO, "Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Bahan Bakar dan Moderator Teras RGTT200K", Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir, Bandung, 4 Juli 2013.
2. HERY ADRIAL, "Analisis Tinggi Teras Kritis Pada Desain RGTT200K", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2014, ISSN: 2355-7524, Pontianak, 19 Juni 2014.
3. AMIN ABEDI, NASER VOSOUGHI, "Neutronic simulation of a pebble bed reactor considering its double heterogeneous nature", Nuclear Engineering and Design 253 (2012) 277–284.

4. MOUSTAFA AZIZ, RIHAM REFEAT, "Burnup and Criticality Analysis of Carbon Coated Particle Fuel In HTR-10 Reactor ", Proceedings of the 7th Conference on Nuclear and Particle Physics, 11-15 Nov. 2009, Sharm El-Sheikh, Egypt.
5. MENG-JEN WANG et al, "Effects of geometry homogenization on the HTR-10 criticality calculations," Nuclear Engineering and Design 271 (2014) 356–360.
6. HERY ADRIAL, PIPING SUPRIATNA, ZUHAIR, "Study Of Lattice Kernel And Pebble Combination On RGTT200K Design", Proceeding Of Meeting And Scientific Presentations Of Basic Research Of Nuclear Science And Technogy", Yogyakarta, (2011).
7. EVI S et al, "Analysis Loading Height of HTR (High Temperature Reactor) Core to Obtain Criticlity of Reactor", Internat. J. Sci. Eng., Vol. 9 (2015).
8. HERY ADRIAL, SUWOTO, ZUHAIR, "Analysis on Fuel Inventory Of HTGR 10 MWt Pebble Bed Based on Burnup Levels Variation Using MCNPX", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016, ISSN: 2355-7524, Batam, 4-5 Agustus 2016.
9. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, "Monte Carlo N-Particle Transport Code System Including MCNP6.1, MCNP5-1.60, MCNPX-2.7.0 and Data Libraries", RSICC CODE PACKAGE CCC-810 August 2013.
10. J. ROSALES et al, "Computational Model for the Neutronic Simulation of Pebble Bed Reactor's Core Using MCNPX", Hindawi Publishing Corporation International Journal of Nuclear Energy International Journal of Nuclear Energy Volume 2014.
11. HONG-CHUL KIM, SONG HYUN KIM, JONG KYUNG KIM, "A new strategy to simulate a random geometry in a pebble-bed core with the Monte Carlo code MCNP", Annals of Nuclear Energy 38 (2011) 1877–1883.
11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance: Benchmark Analysis related to Initial Testing of the HTTR and HTR-10", TECDOC-1382, IAEA (2003).
12. YASUNOBU NAGAYA et al, "Analysis of The HTR-10 Initial Core With A Monte Carlo Code MVP", PHYSOR 2004 -The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments, Chicago, Illinois, April 25-29, 2004.
13. XINGQING JING et al, " Prediction calculations and experiments for the first criticality of the 10 MW High Temperature Gas-cooled Reactor Test Module, [Nuclear Engineering and Design](#), Volume 218, Issues 1–3, October 2002, Pages 43–49.