

PEMODELAN TERAS UNTUK ANALISIS PERHITUNGAN KONSTANTA MULTIPLIKASI REAKTOR HTR-PROTEUS

Zuhair, Suwoto, Ign. Djoko Irianto
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN

Diterima editor 03 Mei 2010
Disetujui untuk dipublikasi 14 Juni 2010

ABSTRAK

PEMODELAN TERAS UNTUK ANALISIS PERHITUNGAN KONSTANTA MULTIPLIKASI REAKTOR HTR-PROTEUS. PTRKN sebagai salah satu unit kerja di BATAN dengan tugas pokok dan fungsi yang berkaitan erat dengan teknologi reaktor dan keselamatan nuklir, menaruh perhatian khusus pada konsep reaktor *pebble bed*. Dalam makalah ini pemodelan reaktor *pebble bed* HTR-PROTEUS dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNP5. Partikel bahan bakar berlapis TRISO dimodelkan secara detail dan eksak dimana distribusi acak partikel ini dalam bola bahan bakar didekati menggunakan *array* teratur kisi SC dengan fraksi *packing* 5,76% tanpa zona eksklusif. Model teras *pebble bed* didekati dengan memanfaatkan kisi teratur dari bola yang disusun sebagai kisi BCC berdasarkan sel berulang yang digenerasi dari sejumlah sel satuan. Hasil perhitungan MCNP5 memperlihatkan kesesuaian yang sangat baik dengan eksperimen, walaupun teras HTR-PROTEUS diprediksi lebih reaktif daripada pengukuran, khususnya di teras 4.2 dan 4.3. Pustaka ENDF/B-VI menunjukkan konsistensi dengan estimasi k_{eff} paling akurat dibandingkan pustaka ENDF/B-V, terutama ENDF/B-VI (66c). Deviasi estimasi k_{eff} yang dihitung dengan eksperimen dikaitkan sebagai konsekuensi dari komposisi reflektor grafit yang dispesifikasikan. Komparasi yang dibuat memperlihatkan bahwa MCNP5 menghasilkan k_{eff} teras HTR-PROTEUS lebih presisi daripada hasil dari MCNP4B dan MCNP-BALL. Hasil ini menyimpulkan bahwa, sukses metodologi pemodelan ini menjustifikasi aplikasi MCNP5 untuk analisis reaktor *pebble bed* lainnya.

Kata-kunci: pemodelan teras HTR-PROTEUS, konstanta multiplikasi, MCNP5

ABSTRACT

CORE MODELING FOR THE ANALYSIS ON MULTIPLICATION CONSTANT CALCULATION OF HTR-PROTEUS REACTOR. PTRKN as a working unit in BATAN whose main duties and functions are related to reactor technology and nuclear safety, concern attention to *pebble bed* reactor concept. In this paper modeling of HTR-PROTEUS *pebble bed* reactor was done using Monte Carlo transport code MCNP5. The TRISO coated fuel particle is modeled in detailed and exact manner where random distributions of these particles in fuel *pebble* is approximated by using regular array of SC lattice with packing fraction of 5.76% without exclusive zone. *Pebble bed* core modeling was approximated by utilizing regular lattice of balls that are arranged as BCC lattice based on repeated cell generated from a numerous unit cell. The MCNP5 calculation results showed that excellent agreement with the experiment, although the HTR-PROTEUS core predicted more reactive than the measurement, especially in cores 4.2 and 4.3. ENDF/B-VI library indicates consistency with the most accurate k_{eff} estimation compared to ENDF/B-V library, mainly ENDF/B-VI (66c). The deviation of calculated k_{eff} estimation with experiment is attributed to the consequence of specified graphite reflector composition. The comparison conducted shows that MCNP5 produces HTR-PROTEUS core k_{eff} is more precise compared to the results of MCNP4B and MCNP-BALL. These results concluded that the success of this modeling methodology justifies MCNP5 application for other *pebble bed* reactor analysis.

Keywords: HTR-PROTEUS core modeling multiplication constant, MCNP5

PENDAHULUAN

Energi nuklir diekspektasi memainkan peranan penting dalam memenuhi kebutuhan listrik dunia di masa mendatang. Selain tidak menimbulkan polusi udara dan gas rumah kaca, energi nuklir memiliki berbagai keunggulan dibandingkan energi lain seperti kesinambungan, keekonomian, keamanan dan keandalan^[1]. Reaktor *pebble bed* modular menjadi pesaing utama dalam sistem energi nuklir dari reaktor generasi terbaru karena desainnya yang sederhana, efisiensi termodinamika, keselamatan alamiah dan ramah lingkungan. Partikel bahan bakar berlapis TRISO yang tersebar dalam matriks grafit akan menghasilkan bentuk limbah yang *excellent* untuk disposal langsung dari bahan bakar bekas dalam repositori geologi^[2].

Reaktor *pebble-bed* merupakan reaktor berpendingin gas helium, bermoderator dan berefektor grafit dengan muatan bahan bakar berbentuk bola. Reaktor ini dianggap paling menjanjikan untuk konsep reaktor kogenerasi karena spektrum neutron termal dan temperatur *outlet* terasnya yang melebihi 900 °C. Salah satu kelebihan teknologi reaktor *pebble-bed* adalah menawarkan terobosan teknologi pengisian bahan bakar tanpa harus menghentikan produksi listrik. Selain itu, partikel bahan bakar *pebble-bed* dengan kernel uranium oksida (UO₂) atau uranium oksikarbida (UCO) yang dilapisi TRISO dan pelapisan silikon karbida (SiC) dianggap sebagai opsi utama dengan pertimbangan performa tinggi pada *burn-up* bahan bakar dan temperatur tinggi.

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) sebagai salah satu unit kerja di BATAN dengan tugas pokok dan fungsi yang berkaitan erat dengan teknologi reaktor dan keselamatan nuklir, menaruh perhatian khusus pada konsep reaktor *pebble bed*. Banyak pemodelan neutronik dikembangkan untuk mendapatkan parameter fisika reaktor *pebble bed* seperti kritikalitas, reaktivitas, distribusi spasial dari daya dan temperatur, panas peluruhan, deplesi dan fraksi bakar bahan bakar. Metode yang menangani sel heterogenitas dengan melakukan transformasi ke sel yang dihomogenisasi secara ekuivalen telah dilakukan dalam berbagai penelitian sebelumnya ^[3-6]. Hasil-hasil yang cukup baik memang telah dicapai namun model yang diterapkan secara eksplisit belum menggunakan geometri nyata yang sebenarnya sehingga desain unik dari reaktor berpendingin gas dengan bahan bakar TRISO memunculkan tantangan substansial bila dibutuhkan prediksi yang lebih akurat dari kelakuan neutronik. Tantangan lain adalah terdapat lebih dari 10¹⁰ kernel dalam konfigurasi reaktor tipikal dengan kesulitan mengidentifikasi kernel bahan bakar secara individual dalam matriks grafit. Oleh karena itu sebagai alternatif metode deterministik, metode Monte Carlo kemudian menjadi solusi walaupun secara praktis memiliki kendala waktu komputasi yang ekstensif.

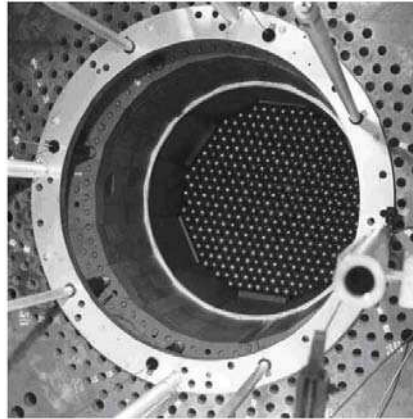
Dalam makalah ini pemodelan teras reaktor *pebble bed* HTR-PROTEUS^[6] dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNP5^[7]. Partikel bahan bakar berlapis TRISO dimodelkan secara detail dan eksak dimana distribusi acak dari partikel ini dalam bola bahan bakar didekati menggunakan *array* teratur kisi SC tanpa zona eksklusif. Model teras *pebble bed* didekati dengan memanfaatkan kisi teratur dari bola yang disusun sebagai kisi BCC berdasarkan sel berulang yang digenerasi dari sejumlah sel satuan. Hasil perhitungan MCNP5 dengan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-V^[8] (50c), serta ENDF/B-VI^[9] (60c dan 66c) kemudian dibandingkan dengan data eksperimen, komparasi dengan prediksi Monte Carlo lainnya dilakukan untuk melengkapi investigasi dan analisis perhitungan konstanta multiplikasi teras reaktor HTR-PROTEUS.

DESKRIPSI HTR-PROTEUS

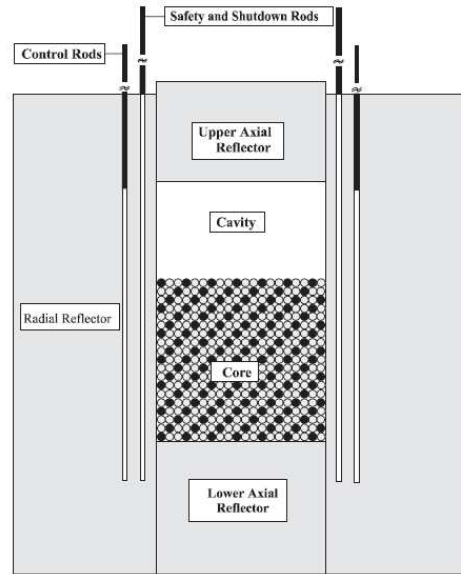
Fasilitas eksperimental HTR-PROTEUS terletak di Institut Paul Scherrer di Switzerland. Fasilitas ini dibangun untuk meningkatkan kepercayaan dalam prediksi kelakuan fisika neutron dari reaktor berpendingin gas temperatur tinggi. Eksperimen di HTR-PROTEUS dikerjakan untuk menentukan reaktivitas teras, profil fluks dan daya, rasio laju-reaksi, reaktivitas batang kendali, reaktivitas racun dapat bakar, parameter kinetik, dan lain-lain. Integral data yang diperoleh ditujukan untuk validasi berbagai metode fisika yang akan digunakan untuk desain teras reaktor berpendingin gas dengan bola bahan bakar berpengkayaan rendah.

Fasilitas HTR-PROTEUS terdiri dari silinder grafit dengan kavitas sentral. Tinggi silinder 3304 mm dan radiusnya 3262 mm. Kavitas dimulai dari ketinggian 780 mm di atas dasar reflektor aksial bagian bawah dengan diameter 1250 mm dan tinggi 1764 mm. Reflektor aksial bagian atas yang dapat digerakkan berupa silinder grafit dengan tinggi 780 mm di dalam tangki aluminium. Sebuah celah udara berada di antara reflektor bagian atas dan teras *pebble bed*^[10-11].

Reflektor radial mempunyai sejumlah kanal yang mengakomodasi batang-batang penyerap dan instrumentasi. Fasilitas HTR-PROTEUS menggunakan 8 batang *shutoff* yang terletak pada radius 689 mm, 4 batang kendali pengaman pada radius 789 mm atau 906 mm, dan 1 batang pengatur pada jarak 900 mm dari pusat teras. Batang *shutoff* dibuat dari bagian-bagian batang paduan baja-boron (*borated steel*, 5 wt%) berdiameter 35 mm yang dimasukkan ke dalam tabung *stainless steel* dengan diameter luar 40 mm. Untuk konfigurasi teras yang pertama, batang kendali bertipe-zebra dan dibuat dari aluminium dengan kadmium. Batang kendali ini diganti dengan batang kendali *stainless steel* standard untuk teras berikutnya. Fasilitas HTR-PROTEUS dilihat dari atas dilukiskan dalam Gambar 1 sedangkan Gambar 2 melukiskan HTR-PROTEUS dilihat dari samping.



Gambar 1. Fasilitas HTR-PROTEUS dilihat dari atas.

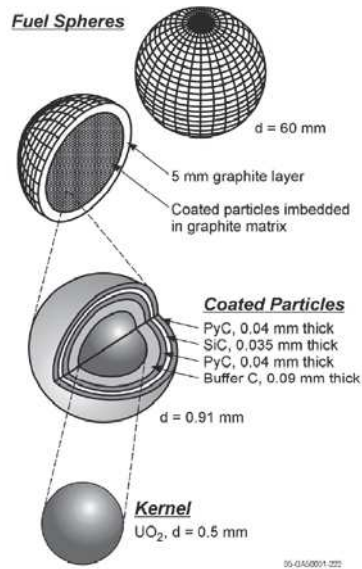


Gambar 2. Fasilitas HTR-PROTEUS dilihat dari samping.

Spesifikasi geometri dan massa bola bahan bakar dan bola moderator HTR-PROTEUS dirangkum dalam Tabel 1. Bola bahan bakar (diameter 6 cm) mengandung ~10.000 partikel bahan bakar berlapis TRISO (*coated fuel particles*, CFP) dengan kernel UO_2 berpengkayaan 16,7 wt% yang terdispersi dalam matriks grafit. Gambar 3 memperlihatkan bola bahan bakar HTR-PROTEUS dan partikel berlapis TRISO.

Tabel 1. Data bola bahan bakar dan bola moderator HTR-PROTEUS.

| | |
|--|-------------------------|
| Massa uranium per bola bahan bakar | 5,966 g |
| Massa ^{235}U per bola bahan bakar | 1,000 g |
| Massa karbon per bola bahan bakar | 193,100 g |
| Radius zona berbahan bakar pada bola bahan bakar | 2,5 cm |
| Radius bola bahan bakar/ bola moderator | 3,0 cm |
| Radius kernel bahan bakar UO_2 | 0,02510 cm |
| Ketebalan lapisan penyangga karbon (C) | 0,00915 cm |
| Ketebalan lapisan karbon pirolitik bagian dalam (IPyC) | 0,00399 cm |
| Ketebalan lapisan silikon karbida (SiC) | 0,00353 cm |
| Ketebalan lapisan karbon pirolitik bagian luar (OPyC) | 0,00400 cm |
| Densitas bahan bakar UO_2 | 10,88 g/cm ³ |
| Densitas lapisan penyangga karbon (C) | 1,100 g/cm ³ |
| Densitas lapisan karbon pirolitik bagian dalam (IPyC) | 1,900 g/cm ³ |
| Densitas lapisan silikon karbida (SiC) | 3,200 g/cm ³ |
| Densitas lapisan karbon pirolitik bagian luar (OPyC) | 1,890 g/cm ³ |
| Jumlah CFP per bola bahan bakar | 9393 |
| Massa karbon dalam bola moderator | 189,1 g |
| Radius bola moderator | 3,0 cm |



Gambar 3. Bola bahan bakar HTR-PROTEUS dan partikel berlapis TRISO.

Partikel berlapis TRISO (diameter~1 mm) terdiri dari kernel UO_2 yang dilapisi oleh empat lapisan, dimulai dari lapisan penyangga karbon berpori (*porous carbon buffer*, C), lapisan piro karbon bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC), lapisan silikon karbida (SiC) hingga lapisan piro karbon bagian luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC). Setiap lapisan memiliki fungsi spesifik dalam unjuk kerja bahan bakar, namun pada dasarnya keempat lapisan berfungsi mencegah terjadinya kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Densitas atom bola bahan bakar dan bola moderator diberikan masing-masing dalam Tabel 2 dan 3 sedangkan densitas atom reflektor yang terbuat grafit diberikan dalam Tabel 4.

Tabel 2. Densitas atom bola bahan bakar HTR-PROTEUS.

| Nuklida | Densitas atom (atom/barn-cm) | | |
|-----------|------------------------------|----------------|--------------|
| | Kernel UO_2 | Matriks grafit | Shell grafit |
| ^{10}B | 0,0 | 2,45968e-08 | 2,47855e-08 |
| ^{11}B | 0,0 | 9,96296e-08 | 1,00394e-07 |
| Karbon | 0,0 | 8,57982e-02 | 8,64563e-02 |
| Oksigen | 4,86157e-02 | 0,0 | 0,0 |
| Silikon | 0,0 | 4,94711e-04 | 0,0 |
| ^{235}U | 4,11729e-03 | 0,0 | 0,0 |
| ^{238}U | 2,01906e-02 | 0,0 | 0,0 |

Tabel 3. Densitas atom bola moderator HTR-PROTEUS.

| Nuklida | Densitas atom (atom/barn-cm) |
|-----------------|------------------------------|
| ^{10}B | 2,40326e-08 |
| ^{11}B | 9,73442e-08 |
| Karbon | 8,38302e-02 |

Tabel 4. Densitas atom reflektor grafit HTR-PROTEUS.

| Nuklida | Densitas atom (atom/barn-cm) | |
|-----------------|------------------------------|------------------|
| | Reflektor aksial | Reflektor radial |
| ^{10}B | 9,00e-09 | 9,20e-09 |
| ^{11}B | 3,60e-08 | 3,70e-08 |
| Karbon | 8,61e-02 | 8,84e-02 |

Diameter dan massa bola bahan bakar diukur pada saat awal dan akhir eksperimen untuk menunjukkan adanya potensi erosi dari grafit selama operasi pemuatan dan pengeluaran bahan bakar (*loading dan unloading*), namun hasil observasi memperlihatkan tidak ada perubahan massa walaupun terjadi beberapa lekukan permukaan^[12].

Tabel 5. Hasil eksperimen kritikalitas teras HTR-PROTEUS.

| Parameter | Teras 4.1 | Teras 4.2 | Teras 4.3 |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| k_{eff} | $1,0134 \pm 0,0011$ | $1,0129 \pm 0,0010$ | $1,0132 \pm 0,0010$ |
| Pemuatan kritis (F, M) | 5020, 5020 | 4940, 4940 | 4900, 4900 |
| Ketinggian kritis | $1,58 \pm 0,01$ m | $1,52 \pm 0,01$ m | $1,50 \pm 0,01$ m |
| Fluks neutron | 5×10^7 n/cm ² /s | 5×10^7 n/cm ² /s | 5×10^7 n/cm ² /s |
| Temperatur udara | 19,8 °C | 19,6 °C | 21,2 °C |
| Tekanan udara | 975 mbar | 980 mbar | 980 mbar |
| Kelembaban | 44 % | 50 % | 50 % |

Eksperimen kritikalitas dilakukan pada tiga konfigurasi teras, yaitu teras 4.1, 4.2 dan 4.3, menggunakan rasio bola bahan bakar dan bola moderator (F/M) 1:1. Kondisi kritikalitas dicapai pada ketinggian tertentu untuk masing-masing teras. Hasil eksperimen kritikalitas teras dirangkum dalam Tabel 5^[13]. Nilai k_{eff} yang berada pada orde 1,013 diperoleh setelah dilakukan koreksi terhadap berbagai efek eksperimen dan insersi batang kendali yang dibutuhkan untuk mempertahankan kritikalitas.

PEMODELAN MCNP5 HTR-PROTEUS

Pemodelan dengan MCNP5 dilakukan dengan membuat geometri yang membentuk reaktor dan merepresentasikan setiap subsistem dengan sel yang batas-batasnya didefinisikan secara matematis menggunakan kombinasi logika permukaan dan menspesifikasikan densitas serta komposisi dari setiap sel.

Dalam kasus HTR-PROTEUS, struktur reaktor dapat dimodelkan secara akurat sesuai dengan desain dan spesifikasi geometri seutuhnya. Tantangan yang sebenarnya

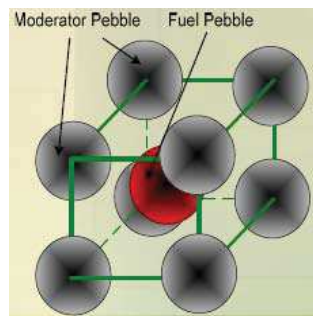
terletak pada pemodelan teras *pebble bed* yang dimuati bola bahan bakar dan bola moderator secara acak. Pemodelan teras *pebble bed* harus didekati dengan kisi teratur dari bola. Beberapa kisi yang tersedia adalah *simple cubic* (SC), *body-centered cubic* (BCC), *face-centered cubic* (FCC), *simple hexagonal* (SH) dan *hexagonal close packed* (HCP). Kisi-kisi ini memiliki jumlah bola dalam sel satuan dan fraksi *packing* maksimum yang berbeda seperti diperlihatkan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Tipe dan sifat-sifat kisi teratur.

| Tipe kisi | Jumlah bola dalam sel satuan | Fraksi <i>packing</i> maksimum |
|-----------|------------------------------|--------------------------------|
| SC | 1 | 0,52359 |
| BCC | 2 | 0,68175 |
| FCC | 4 | 0,74048 |
| SH | 6 | 0,60459 |
| HCP | 6 | 0,74048 |

Kisi SC dan SH seringkali tidak dapat digunakan untuk banyak teras karena densitas *packing*nya yang rendah. Pemilihan kisi bergantung pada abilitas kisi untuk merepresentasikan kombinasi-kombinasi bola secara spesifik, karena fraksi *packing* dapat dicapai dengan mengatur ukuran sel. Sebagai contoh, ukuran sel satuan a dikaitkan dengan radius bola R dan fraksi *packing* f memenuhi relasi berikut:

$$a = R * \sqrt[3]{\frac{8\pi}{3f}} \tag{1}$$



Gambar 4. Struktur BCC.

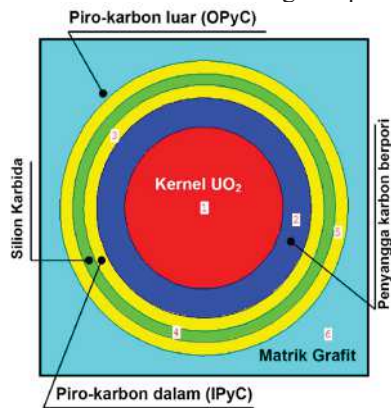
Tabel 7. Parameter kisi model MCNP5 teras HTR-PROTEUS.

| HTR-PROTEUS | Fraksi <i>packing</i> | Ukuran sel (cm) |
|-------------|-----------------------|-----------------|
| Teras 4.1 | 0,600 | 7,223988 |
| Teras 4.2 | 0,615 | 7,164773 |
| Teras 4.3 | 0,618 | 7,153160 |

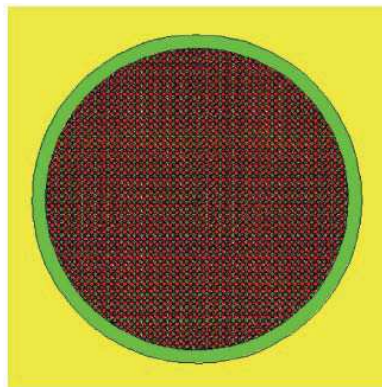
Teras yang dikarakterisasi oleh rasio bola bahan bakar dan bola moderator 1:1 dimodelkan paling mudah oleh kisi BCC karena sel satuannya hanya terdiri dari dua bola seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Seluruh bola yang dikandung dalam kisi FCC dan HCP diposisikan di sepanjang batas datar dari sel satuan sehingga sulit memodelkan susunan yang memungkinkan dari bola bahan bakar dan bola moderator karena bola-bola yang berdekatan saling tumpang tindih secara tidak konsisten. Karena itu, walaupun *packing* bola dalam teras

pebble bed diekspektasi mendekati kisi HCP namun kisi BCC menjadi pilihan yang tepat. Ini disebabkan kisi BCC dapat menyediakan ukuran *packing* yang secara tipikal dijumpai di reaktor *pebble bed*.

Konfigurasi teras HTR-PROTEUS memiliki fraksi *packing* yang berbeda karena bola-bola dimuatkan dengan cara yang berbeda^[12]. Dalam teras 4.1 bola bahan bakar dan bola moderator dimuatkan secara paralel dimana setiap bola dimasukkan ke dalam teras dari masing-masing kanalnya. Metode kedua digunakan untuk pemuatan teras 4.2 dan 4.3 dimana bola bahan bakar dan bola moderator dimasukkan secara kombinasi melalui kanal yang sama. *Pebble bed* kemudian diratakan setelah setiap langkah pemuatan selesai dikerjakan dan ketinggian teras *pebble bed* diukur. Tabel 7 merangkum parameter kisi *pebble bed*.

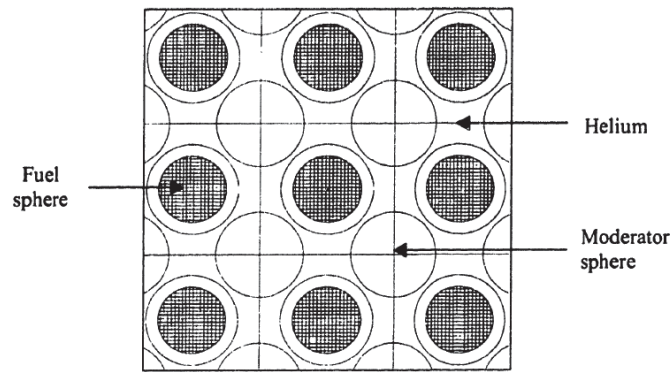


Gambar 5. Model MCNP5 partikel berlapis TRISO.

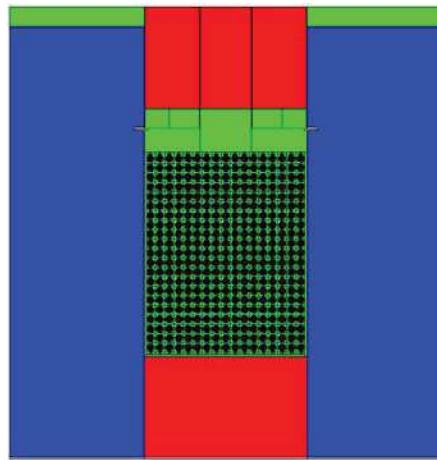


Gambar 6. Model MCNP5 bola bahan bakar.

Pemodelan HTR-PROTEUS dengan MCNP5 diawali dengan memodelkan partikel bahan bakar berlapis TRISO secara detail dan eksak seperti diperlihatkan dalam Gambar 5. Distribusi acak dari partikel berlapis ini dalam bola bahan bakar didekati menggunakan *array* teratur kisi SC dengan fraksi *packing* 5,76 % tanpa zona eksklusif seperti diperlihatkan dalam Gambar 6. Gambar 7 memperlihatkan sebuah irisan yang merepresentasikan teras BCC sedangkan Gambar 8 memperlihatkan model MCNP5 reaktor HTR-PROTEUS secara utuh dan lengkap.



Gambar 7. Model MCNP5 teras pebble bed HTR-PROTEUS.



Gambar 8. Model MCNP5 reaktor HTR-PROTEUS.

HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Dalam perhitungan HTR-PROTEUS, model teras *pebble bed* didekati dengan memanfaatkan kisi teratur dari bola yang disusun sebagai kisi BCC berdasarkan sel berulang yang digenerasi dari sejumlah sel satuan. Struktur berulang MCNP5 menyebabkan munculnya bola-bola parsial di sekeliling teras yang secara tidak langsung akan menambah bahan bakar ekstra ke dalam teras. Kelebihan bahan bakar yang dikontribusi oleh bola bahan bakar parsial harus dieliminasi dengan melakukan koreksi. Koreksi dikerjakan dengan mereduksi volume teras dimana fraksi *packing* bola dipertahankan tidak berubah, atau dengan mereduksi fraksi *packing* bola dimana volume teras dipertahankan tidak berubah. Kedua pendekatan ini mengandalkan sebuah zona eksklusif yang mengkompensasi kontribusi bola-bola parsial. Ukuran zona eksklusif diberikan oleh radius bola yang ditentukan oleh rasio jumlah bola bahan bakar dan jumlah total bola dalam sel satuan. Karena rasio bola bahan bakar (F) dan bola moderator (M) HTR-PROTEUS 1:1, maka zona eksklusif setebal

1,5 cm di sekeliling teras diaplikasikan yang diperoleh dari $R \times F / (F+M)$, dimana R radius bola, F dan M masing-masing l.

Sebanyak 10 siklus di-skip dari total 110 siklus dengan 5.000 neutron per siklus digunakan dalam *kcode card*. Dengan kata lain, 10 siklus iterasi tak aktif dengan 50.000 *history* neutron dan 100 siklus iterasi aktif dengan 500.000 *history* neutron disimulasikan MCNP5 untuk mendapatkan hasil dengan akurasi yang cukup tinggi. Distribusi sumber neutron fisi awal stabil yang dimasukkan dalam *ksrc card* berada dalam kernel bahan bakar yang terdistribusi dalam matriks grafit. Dalam analisis ini, pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-V (50c) serta ENDF/B-VI (60 c dan 66 c)I dimanfaatkan untuk seluruh isotop. Data hamburan termal $S(\alpha,\beta)$ *graph.01t* digunakan dalam *mt card* untuk seluruh material yang mengandung karbon guna melengkapi pertimbangan interaksi neutron termal di bawah energi ~ 4 eV dengan grafit. Seluruh perhitungan dikerjakan dalam temperatur kamar 300K. Kondisi vakum dikerjakan pada batas luar dari sistem reaktor HTR-PROTEUS.

Hasil perhitungan konstanta multiplikasi teras HTR-PROTEUS dirangkum dalam Tabel 8. Hasil perhitungan MCNP5 memperlihatkan kesesuaian yang sangat baik dengan eksperimen dimana rasio C/E berada dalam rentang 0,98992-1,00201. Dari Tabel ini dapat diamati bahwa teras HTR-PROTEUS diprediksi lebih reaktif daripada pengukuran, khususnya di teras 4.2 dan 4.3. Pustaka ENDF/B-VI menunjukkan konsistensi dengan estimasi k_{eff} paling akurat dibandingkan pustaka ENDF/B-V, terutama ENDF/B-VI (66c). Deviasi estimasi k_{eff} yang dihitung dengan eksperimen dikaitkan sebagai konsekuensi dari komposisi reflektor grafit yang dispesifikasikan. Kandungan impuritas dalam reflektor menghasilkan konstanta multiplikasi reaktor yang sedikit berbeda daripada yang diukur dengan aproksimasi 1,01% $\Delta k/k$.

Tabel 8. Hasil perhitungan MCNP5 HTR-PROTEUS.

| Konfigurasi HTR-PROTEUS | | Data eksperimen | Hasil perhitungan MCNP5 | | |
|-------------------------|-----------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | ENDF/B-V (50c) | ENDF/B-VI (60c) | ENDF/B-VI (66c) |
| Teras 4.1 | k_{eff} | $1,0134 \pm 0,0011$ | $1,00479 \pm 0,00118$ | $1,00318 \pm 0,00127$ | $1,00608 \pm 0,00115$ |
| | C/E | | 0,99150 | 0,98992 | 0,99278 |
| Teras 4.2 | k_{eff} | $1,0129 \pm 0,0008$ | $1,01186 \pm 0,00107$ | $1,01304 \pm 0,00115$ | $1,01494 \pm 0,00118$ |
| | C/E | | 0,99897 | 1,00014 | 1,00201 |
| Teras 4.3 | k_{eff} | $1,0132 \pm 0,0007$ | $1,01343 \pm 0,00124$ | $1,01109 \pm 0,00117$ | $1,01341 \pm 0,00125$ |
| | C/E | | 1,00023 | 0,99792 | 1,00021 |

Hasil perhitungan MCNP5 dan komparasinya dengan MCNP4B^[14] dan MCNP-BALL^[15] disajikan dalam Tabel 9. Dari Tabel ini dapat diamati bahwa MCNP5 memproduksi k_{eff} teras HTR-PROTEUS lebih presisi daripada yang diestimasi MCNP4B dan MCNP-BALL. Ini diprediksi sebagai akibat dari kapabilitas MCNP5 yang ditingkatkan dalam opsi tambahan fisika tumbukan fotonuklir dan data neutron kasip yang tidak lagi mengasumsikan neutron lahir dari reaksi fisi semuanya adalah neutron serentak (*prompt neutron*).

Tabel 9. Hasil perhitungan MCNP5 dan komparasinya dengan MCNP4B dan MCNP-BALL.

| Konfigurasi HTR-PROTEUS | | Data eksperimen | Hasil perhitungan | | |
|-------------------------|------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| | | | MCNP5 | MCNP4B | MCNP-BALL |
| Teras 4.1 | k_{eff} | $1,0134 \pm 0,0011$ | $1,00608 \pm 0,00115$ | $1,0208 \pm 0,0011$ | $1,0206 \pm 0,0011$ |
| | C/E | | 0,99278 | 1,0073 | 1,0071 |
| Teras 4.2 | k_{eff} | $1,0129 \pm 0,0008$ | $1,01304 \pm 0,00115$ | $1,0172 \pm 0,0010$ | $1,0168 \pm 0,0011$ |
| | C/E | | 1,00014 | 1,0042 | 1,0039 |
| Teras 4.3 | k_{eff} | $1,0132 \pm 0,0007$ | $1,01341 \pm 0,00125$ | $1,0176 \pm 0,0011$ | $1,0172 \pm 0,0011$ |
| | C/E | | 1,00021 | 1,0043 | 1,0039 |

KESIMPULAN

Pemodelan teras untuk analisis perhitungan konstanta multiplikasi reaktor HTR-PROTEUS telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNP5. Pemodelan diawali dengan memodelkan partikel bahan bakar berlapis TRISO secara detail dan eksak, kemudian bola bahan bakar yang disusun oleh ribuan partikel berlapis dimodelkan menggunakan *array* teratur kisi SC. Teras *pebble bed* selanjutnya dimodelkan dengan memanfaatkan kisi BCC.

Hasil perhitungan MCNP5 memperlihatkan kesesuaian yang sangat baik dengan eksperimen. Pustaka ENDF/B-VI menunjukkan konsistensi dengan estimasi k_{eff} paling akurat dibandingkan pustaka ENDF/B-V. MCNP5 menghasilkan k_{eff} teras HTR-PROTEUS lebih presisi dibandingkan dengan hasil dari MCNP4B dan MCNP-BALL. Hasil ini menyimpulkan bahwa, pemodelan ini menjustifikasi aplikasi MCNP5 untuk analisis reaktor *pebble bed* lainnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan motivasi dan inspirasi untuk melakukan riset ini. Terimakasih kami sampaikan pula kepada Drs. Sudarmono, M.Si. dan Dra. Itjeu Karliana atas dorongan dan dukungan semangat yang membesarkan hati kami. Koreksi dan saran yang amat berarti serta wawasan yang dalam dari Ir. Iman Kuntoro, APU untuk perbaikan makalah ini, sangat kami hargai.

DAFTAR PUSTAKA

1. ANONYMOUS. A technology roadmap for generation iv nuclear energy systems. US DOE nuclear energy and the generation IV international forum (GIF). December 2002
2. P.E. Owen and K.R. Czerwinski. Waste characteristics of spent nuclear fuel from a pebble bed reactor. MIT, report MIT-NFC-TR-023. June 2000
3. Ferhat Aziz. Perhitungan benchmark nilai reaktivitas elemen kendali reaktor temperatur tinggi HTR-10. Prosiding lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XV. Jakarta; 13-14 Juli 2004

4. Ferhat Aziz. Analisis pasca-kritikalitas pertama reaktor temperatur tinggi HTR-10 China. Prosiding lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XII. Jakarta; 4-5 Juli 2001
5. Deby Mardiansah, Zaki Su'ud. Studi desain reaktor temperatur tinggi berumur panjang berpendingin Pb-Bi dan Pb menggunakan bahan bakar thorium. Prosiding lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir 2008. Serpong; 6-7 Agustus 2008
6. Hans D. Gougar. Results of a neutronic simulation of HTR-Proteus core 4.2 using PEBBED and other INL reactor physics tools: FY-09 report. INC/EXT-09-16620; September 2009
7. F.B. Brown, *et al.* MCNP – A general monte carlo n-particle transport code. Version 5. LA-UR-03-1987. April 24, 2003
8. DLC-105/MCNPDAT. Standard neutron cross section data library derived from ENDF/B-V for MCNP Version 4. Radiation shielding center. 1994
9. J.S. Hendricks, S.C. Franke, J.D. Court. ENDF/B-VI data for MCNP. Los Alamos National Laboratory Report. LA-12891. 1994
10. IAEA. Critical experiments and reactor physics calculations for low-enriched high temperature gas cooled reactors. IAEA-TECDOC-1249. Vienna; 2001
11. D. Mathews and R. Chawla. LEU-HTR PROTEUS calculational benchmark specifications. Paul Scherrer Institute. Report TM-41-90-32. October 1990
12. C.R. Craig, W.D. Nix and A.S. Tetelman. The principle of engineering materials. Prentice-Hall. Englewood Cliffs; 1973
13. T. Williams. LEU-HTR PROTEUS: Configuration descriptions and critical balances for the cores of the HTR-PROTEUS experimental programme. Paul Scherrer Institute. Report TM-41-95-18. November 1996
14. J.F. Briesmeister (ED.). MCNP – A general monte carlo code for neutron and photon transport. Version 4B. Los Alamos National Laboratory. Los Alamos NM; 1997
15. I. Murata and A. Takahashi. Analysis of critical assembly experiments by continuous energy monte carlo method with statistical geometry model. Technology reports of the Osaka University. Vol. 48, No. 230118; April 1998