

**STUDI PERHITUNGAN KOEFISIEN REAKTIVITAS TEMPERATUR *SMALL PEBBLE BED*  
REACTOR BERBAHAN BAKAR TIPE *WALLPAPER* MENGGUNAKAN PROGRAM  
TRANSPORT MONTE CARLO MCNPX 2.6.0**

**M. Arlan Sukma Gumilar<sup>1</sup>, Zuhair<sup>2</sup>, M. Nurul Subkhi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Prodi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Gunung Djati Bandung  
Jl. A.H Nasution 105, Cibiru- Bandung, Indonesia.

<sup>2</sup>Pusat Teknologi Keselamatan dan Reaktor Nuklir – BATAN  
Kawasan Puspptek Gedung No. 80, Serpong, Tangerang 15310

\*Email: [arlansukmagumilar@yahoo.co.id](mailto:arlansukmagumilar@yahoo.co.id)

---

**Abstrak**

Konsep bahan bakar *wallpaper* dikembangkan untuk menurunkan temperatur puncak bahan bakar dengan memberikan modifikasi yang baru pada bahan bakar *pebble* dimana material grafit dengan radius tertentu ditempatkan di pusat bahan bakar sehingga zona bahan bakar hanya tersebar di bagian permukaan dalam *pebble*. Penelitian ini difokuskan pada perhitungan dan analisis parameter neutronika reaktor yang disebut koefisien reaktivitas temperatur teras. Reaktor *pebble bed* HTR-10 dipilih sebagai objek reaktor dalam penelitian. Seluruh perhitungan dilakukan dengan menggunakan program transport Monte Carlo MCNPX 2.6.0 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI. Dalam studi ini, koefisien reaktivitas temperatur dihitung dalam tiga tahap perhitungan, yakni perhitungan koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, koefisien reaktivitas temperatur moderator dan kombinasi koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator. Hasil analisis memperlihatkan bahwa kenaikan temperatur bahan bakar menunjukkan nilai koefisien reaktivitas yang negatif pada fraksi *packing* partikel 5.5% hingga 20%, sedangkan pada fraksi *packing* 25% dan 30% koefisien reaktivitas temperatur bernilai positif. Pada tahap perhitungan koefisien reaktivitas temperatur moderator, seluruh perhitungan menunjukkan nilai yang negatif untuk seluruh fraksi *packing* yang dipertimbangkan dan terus mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur moderator. Untuk perhitungan kombinasi koefisien reaktivitas, fraksi *packing* partikel 5.5% hingga 20% memperlihatkan penurunan nilai koefisien reaktivitas sedangkan pada fraksi *packing* partikel 25% dan 30% menunjukkan nilai koefisien reaktivitas yang meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur bahan bakar dan moderator. Meskipun demikian, secara umum operasi reaktor berada pada kondisi aman ditinjau dari hasil perhitungan secara keseluruhan yang memperlihatkan kondisi cukup baik dengan nilai koefisien reaktivitas temperatur yang negatif untuk seluruh kenaikan temperatur bahan bakar dan moderator.

Kata Kunci: bahan bakar tipe *wallpaper*, reaktor *pebble bed*, MCNPX 2.6.0, ENDF/B-VI, fraksi *packing*, koefisien reaktivitas temperatur.

---

**Abstract**

The concept of fuel *wallpaper* was developed to reduce the peak temperature of the fuel by giving a new modification to the *pebble* fuel where graphite material with a certain radius is placed in the center of the fuel so that the fuel zone is only spread on the surface in the *pebble*. This study focused on the calculation and analysis of reactor neutronics parameters called the terrace temperature reactivity coefficient. The HTR-10 *pebble bed* reactor was chosen as the reactor object in the study. All calculations are performed using the MCNPX 2.6.0 Monte Carlo transport program and the ENDF / B-VI continuous energy nuclear data library. In this study, the temperature reactivity coefficient was calculated in three calculation stages, namely the calculation of the fuel temperature reactivity coefficient, the moderator temperature reactivity coefficient and the combination of fuel temperature reactivity coefficients and moderators. The results of the analysis show that the increase in fuel temperature shows a negative reactivity coefficient in particle packing fractions of

5.5% to 20%, while in the packing fraction of 25% and 30% the coefficient of temperature reactivity is positive. In the calculation phase of the moderator temperature reactivity coefficient, all calculations show a negative value for all packing fractions that are considered and continue to decrease with increasing moderator temperature. For the calculation of the reactivity coefficient combination, the packing fraction of particles of 5.5% to 20% showed a decrease in reactivity coefficient while the packing fraction of 25% and 30% showed a reactivity coefficient which increased with increasing fuel temperature and moderator. Nevertheless, in general the reactor operation is in a safe condition in terms of the results of the overall calculation which shows a fairly good condition with a negative temperature reactivity coefficient for all fuel temperature increases and moderators.

Keywords : Biodiesel, Waste Cooking Oil, Small Industry

## 1. Pendahuluan

Kecenderungan penelitian dan pengembangan energi dewasa ini tertuju pada pemanfaatan energi yang berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang dianggap sebagai salah satu alternatif penghasil energi yang menjanjikan mengingat ketersediaan bahan bakar organik yang sangat terbatas. Berbagai negara dibelahan dunia mengalihkan perhatian pada pemanfaatan reaktor nuklir sebagai penghasil energi. Dalam hal pembangkitan listrik, PLTN memiliki prinsip yang sama dengan pembangkit listrik lain misalnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Dengan membangkitkan uap pada tekanan dan temperatur yang tinggi, uap yang dihasilkan disalurkan ke turbin untuk membangkitkan listrik. Yang berbeda dari kedua tipe pembangkit listrik ini adalah mesin pembangkit uapnya, PLTU menggunakan mesin berupa ketel uap sedangkan PLTN berupa reaktor nuklir.

Dengan diakuinya energi nuklir sebagai solusi dalam memenuhi kebutuhan energi, konsep reaktor temperatur tinggi (*Hight Temperature Reactor*, HTR) menjadi salah satu objek yang paling diminati oleh para ahli fisika reaktor. HTR merupakan salah satu jenis reaktor Generasi IV yang mengutamakan keamanan dan keandalan (*safety and reliability*). Aspek keselamatan menjadi satu kajian yang sangat penting dalam bidang fisika reaktor. Hal ini karena keselamatan menjadi faktor yang paling diperhitungkan dalam kelayakan operasi dari reaktor nuklir. Banyak parameter-parameter yang mempengaruhi tingkat keselamatan dari suatu reaktor nuklir. Salah satunya dalam aspek neutronika reaktor adalah faktor multiplikasi neutron yang sekaligus berkaitan erat dengan koefisien reaktivitas teras reaktor.

Reaktivitas menyatakan perubahan faktor multiplikasi teras reaktor atau dapat pula didefinisikan sebagai perubahan populasi neutron dalam satu siklus per populasi neutron pada akhir siklus [1]. Reaktivitas di dalam teras reaktor bisa terjadi akibat adanya perubahan sifat fisis seperti perubahan temperatur bahan bakar dan temperatur moderator. Besaran yang digunakan untuk mengukur perubahan reaktivitas ini disebut koefisien reaktivitas. Koefisien reaktivitas memainkan peranan yang sangat penting dalam pengoperasian reaktor nuklir. Koefisien reaktivitas negatif menjadi ukuran yang

diharapkan karena akan membuat kondisi reaktor stabil sedangkan koefisien reaktivitas positif membuat reaktor tidak stabil [2].

Sebelumnya sudah banyak dilakukan perhitungan koefisien reaktivitas temperatur untuk berbagai tipe reaktor berbahan bakar *pebble* dengan hasil yang cukup baik. Namun perhitungan koefisien reaktivitas temperatur reaktor yang dengan bahan bakar tipe *wallpaper* masih belum banyak dilakukan. Pada tahun 2009 Alain Marmier dkk melakukan penelitian terkait dengan pemanfaatan bahan bakar tipe *wallpaper* untuk menghitung parameter reaktor PBMR baik dalam aspek neutronika maupun termohidraulika. Perhitungan kemudian dibandingkan dengan bahan bakar *pebble* tipe klasik PBMR. Dengan hasil yang cukup baik khususnya pada aspek reaktivitas dimana reaktor mengalami penurunan reaktivitas teras seiring dengan bertambahnya temperatur.

Bahan bakar tipe *wallpaper* sendiri pada awalnya dikembangkan oleh Teuchert dan Rutten pada tahun 1970 dengan memberikan modifikasi yang baru dari bahan bakar *pebble*, dimana lokasi distribusi partikel TRISO di dalam kulit bola hanya tersebar di bagian permukaan dalam *pebble*. Pendekatan ini digunakan untuk menghindari posisi partikel bahan bakar di bagian tengah *pebble* sebagai zona temperatur tertinggi [3].

Berdasarkan uraian diatas, maka penelitian ini bertujuan untuk menghitung koefisien reaktivitas temperatur *small pebble bed reactor* berbahan bakar tipe *wallpaper* menggunakan program transport Monte Carlo MCNPX 2.6.0". Reaktor *pebble bed* yang diseleksi dalam penelitian adalah HTR-10 yang dioperasikan oleh Universitas Tsinghua, Beijing, China. HTR-10 dipilih berdasarkan karakteristiknya yang hampir sama dengan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang saat ini sedang dikembangkan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Hasil yang baik diharapkan sebagai upaya memberikan kontribusi berupa opsi penggunaan bahan bakar tipe *wallpaper* kepada pihak BATAN.

## 2. Koefisien Reaktivitas Temperatur

Selama reaktor dioperasikan, terjadi perubahan reaktivitas teras. Reaktivitas merupakan suatu besaran yang menyatakan perubahan faktor multiplikasi teras

reaktor atau dapat pula didefinisikan sebagai perubahan populasi neutron dalam satu siklus per populasi neutron pada akhir siklus [1]. Reaktivitas di dalam teras reaktor bisa terjadi akibat adanya perubahan sifat fisis seperti perubahan temperatur bahan bakar dan temperatur moderator. Secara matematis reaktivitas dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

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

dengan,  $\rho$  : reaktivitas  
 $k_{eff}$  : faktor multiplikasi efektif

Dalam pengendalian reaktor, perubahan reaktivitas akibat berubahnya temperatur bahan bakar dan moderator disebut koefisien reaktivitas temperatur. Nilai dari koefisien reaktivitas temperatur didesain bernilai negatif. Hal ini agar reaktor memiliki *inherent safety*, sehingga jika terjadi kenaikan temperatur bahan bakar atau moderator akibat meningkatnya daya reaktor, maka reaktivitas teras akan berkurang sehingga reaktor terkendali dengan aman.

Koefisien reaktivitas temperatur ( $\alpha_T$ ) didefinisikan sebagai turunan parsial reaktivitas terhadap perubahan temperatur.

$$\alpha_T = \frac{\delta\rho}{\delta T} \quad (2)$$

dengan,  $\delta\rho$  : perubahan reaktivitas  
 $\delta T$  : perubahan temperature

Nilai koefisien reaktivitas temperatur akan menentukan kestabilan reaksi nuklir dalam reaktor. Dalam kasus koefisien reaktivitas temperatur yang bernilai positif, maka kenaikan temperatur akan menyebabkan peningkatan reaktivitas yang mengakibatkan peningkatan daya pada reaktor. Sebaliknya, apabila koefisien reaktivitas temperatur bernilai negatif, maka kenaikan temperatur akan menyebabkan penurunan reaktivitas dan penurunan daya reaktor sehingga reaktor cenderung dalam keadaan aman [1].

Dalam reaktor *pebble bed*, koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (*fuel temperature coefficient of reactivity*,  $\alpha_{TF}$ ) dan koefisien reaktivitas temperatur moderator (*moderator temperature coefficient of reactivity*,  $\alpha_{TM}$ ) merupakan dua koefisien reaktivitas yang paling dominan [2]. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$\alpha_{TF} = \frac{\delta\rho}{\delta T_F} \quad (3)$$

$$\alpha_{TM} = \frac{\delta\rho}{\delta T_m} \quad (4)$$

Dengan  $T_F$  dan  $T_M$  masing-masing adalah temperatur bahan bakar dan temperatur moderator

### 3. Deskripsi HTR-10

*High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR) merupakan salah satu kandidat potensial diantara berbagai macam desain reaktor nuklir Generasi IV. Jenis reaktor dengan pendingin berupa gas ini mampu menghasilkan panas temperatur tinggi hingga mencapai 1000°C sehingga menjadi salah satu alternatif penghasil energi yang dapat dimanfaatkan di berbagai bidang.

Karakteristik unik yang menonjol dari reaktor HTGR adalah konstruksi teras yang didominasi oleh bahan moderator grafit dan temperatur operasi yang dapat ditingkatkan menjadi tinggi. Dalam perkembangannya terdapat dua tipe reaktor HTGR, yaitu tipe prismatic yang dikembangkan di USA dan Jepang serta tipe bola (*pebble bed*) yang dikembangkan di Jerman, China, Rusia, Switzerland dan Afrika Selatan yang kemudian dikenal dengan sebutan Reaktor Temperatur Tinggi (*High Temperature Reactor*, HTR).

HTR-10 adalah salah satu dari sekian banyak jenis reaktor temperatur tinggi yang dibangun dan dioperasikan oleh INET (Institute of Nuclear Energy Technology), Universitas Tsinghua di timur laut Beijing, China. Secara umum HTR-10 dibangun dengan tujuan untuk mendemonstrasikan fitur teknis dan keselamatan pada HTGR modular [4].

Sama seperti reaktor temperatur tinggi lainnya, HTR-10 memiliki karakteristik khusus yang melekat khususnya dalam aspek keselamatan (*inherent safety*). Karakteristik ini diantaranya berasal dari elemen bahan bakar berkualitas tinggi dari partikel TRISO yang dapat mencegah terjadinya kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik serta menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Karakteristik lain dari jenis reaktor ini adalah koefisien reaktivitas bahan bakarnya yang didesain bernilai negatif yang akan membuat reaktor padam (*shutdown*) dengan sendirinya ketika kondisi kecelakaan terjadi.

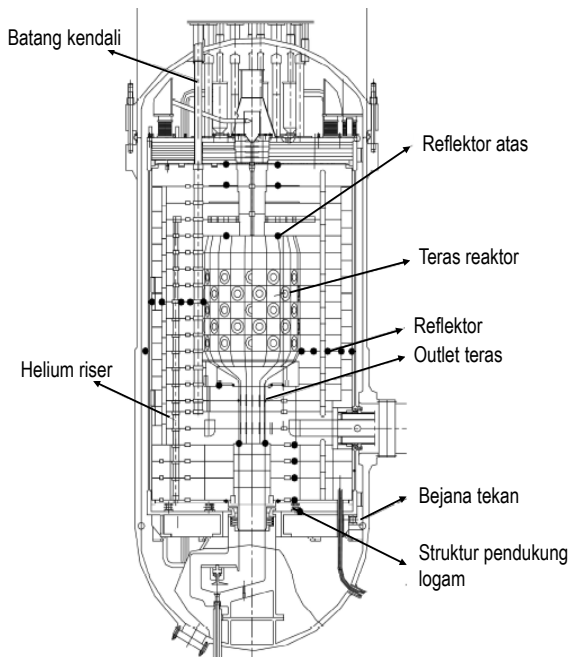
HTR-10 didesain dengan memanfaatkan ribuan bahan bakar berbentuk bola (*spherical*). Setiap bahan bakar bola tersusun atas 8.335 partikel berlapis (*coated particles*) yang terdispersi dalam matriks grafit. Dalam reaktor ini dapat diyakinkan bahwa temperatur maksimum yang dihasilkan bahan bakar ini tidak akan melampaui batas 1600°C.

Teras HTR-10 memiliki diameter 180 cm dan ketinggian teras rerata 197 cm. Teras aktif yang berisi campuran bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* dikelilingi oleh reflektor grafit sedangkan reflektor grafit

itu sendiri dikelilingi oleh lapisan tembok karbon terboronasi (*boronated carbon bricks*). Di sisi reflektor bagian dalam di dekat teras aktif terdapat 10 kanal berdiameter 130 mm untuk insersi batang kendali, 7 kanal untuk bola-bola penyerap kecil dan 3 kanal berdiameter 130 mm untuk iradiasi. Di sisi reflektor bagian luar terdapat 20 kanal aliran berupa kanal berdiameter 80 mm untuk helium *inlet* reaktor [5]. **Tabel 1** merangkum parameter reaktor dan spesifikasi teras HTR-10 sedangkan **Gambar 1** mengilustrasikan skema fitur reaktor HTR-10.

**Tabel 1.** Parameter reaktor dan spesifikasi teras HTR-10 [6].

Parameter Reaktor	Ukuran
Daya Teras	10 MW
Tinggi / Diameter Teras	197 cm / 180cm
Tekanan primer Helium	3 Mpa
Temperatur Inlet / Outlet	250°C / 700°C
Diameter bahan bakar <i>pebble bed</i>	6,0 cm
Laju aliran massa pendingin	4,3 kg/s
Pendingin	Helium
Reflektor dan Moderator	Grafit
Daya Termal Rata-rata	0,36 kW/FE
Jumlah control rod	10
Elemen bahan bakar	UO <sub>2</sub>
Jumlah elemen bahan bakar	27000
Temperatur maks. Bahan bakar (operasi normal)	919°C
Burn-up maksimum	87072 MWd tH/M
Burn-up rata-rata	80000 MWd tH/M

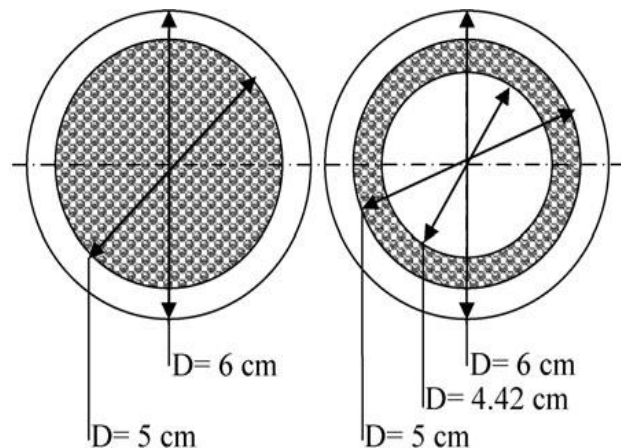


**Gambar 1:** Skema teras reaktor *pebble bed* HTR-10 [7].

Pemuatan teras dilakukan dengan pola multi-pass dan diawali dengan menempatkan moderator *pebble* atau bola *dummy* yang terbuat dari grafit ke dalam daerah konus

(kerucut) yang terletak di bagian bawah dari teras reaktor. Campuran bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* kemudian dimuatkan secara gradual untuk mencapai kritikalitas pertama. Persentase jumlah bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* dalam teras masing-masing 0,57 dan 0,43. Setelah kritikalitas pertama tercapai, campuran *pebble* tersebut dengan perbandingan yang sama dimuatkan selanjutnya hingga teras penuh agar reaktor dapat dioperasikan pada daya penuh. Teras penuh diestimasi memiliki volume 5m<sup>3</sup> [8].

Dalam studi ini, bahan bakar tipe *wallpaper* digunakan dengan menempatkan ribuan partikel TRISO di permukaan dalam *pebble*. Gambar 2 memperlihatkan skema geometrik desain bahan bakar klasik dan *wallpaper*. Bahan bakar tipe *wallpaper* menawarkan modifikasi yang baru pada desain bahan bakar *pebble* dimana lokasi partikel TRISO di dalam kulit bola dimodelkan lebih dekat dengan permukaan *pebble*. Hal ini akan menghasilkan pendekatan yang menghindari posisi partikel bahan bakar di bagian pusat sebagai zona temperatur tertinggi. Dengan demikian temperatur rata-rata partikel bahan bakar akan berkurang yang konsekuensinya akan mengurangi kemungkinan kegagalan dan pelepasan gas fisik [3].



**Gambar 2:** Desain bahan bakar HTR *pebble bed* model klasik dan *wallpaper* [9].

Selain memberikan modifikasi yang baru, bahan bakar tipe *wallpaper* juga meningkatkan kepadatan di zona bebas bahan bakar sentral. Dengan menaikkan fraksi *packing* partikel, kernel bahan bakar dikondensasikan dengan diameter luar zona bahan bakar, sehingga menghasilkan bagian tengah *pebble* bebas dari bahan bakar. Parameter yang dioptimalkan dalam konsep bahan bakar tipe *wallpaper* adalah fraksi *packing* partikel dan radius grafit sentral. Dengan mengasumsikan fraksi *packing* sebesar 30% pada bahan bakar *pebble* PBMR maka didapatkan radius maksimum zona bebas bahan bakar sebesar 2.21 cm.

**4. Pemodelan MCNPX2.6.0 HTR-10**

Di dalam reaktor nuklir bahan bakar memiliki peranan yang sangat penting karena fungsinya sebagai penghasil energi dari reaksi fisi yang terjadi di dalam teras reaktor. Seperti bahan bakar *pebble* tipe klasik, bahan bakar tipe *wallpaper* berdiameter 6 cm dengan ketebalan lapisan *shell* grafit 0.5 cm. Konsep bahan bakar ini juga memanfaatkan partikel berlapis TRISO sebagai penyusun bahan bakar.

Parameter yang dioptimalkan dalam konsep bahan bakar tipe *wallpaper* ini adalah fraksi *packing* partikel yang akan berpengaruh pada ukuran radius grafit sentral. Dengan mengasumsikan fraksi *packing* partikel dalam bahan bakar *pebble* berkisar antara 5.5% dan 30% maka radius minimum dan maksimum zona bebas bahan bakar berkisar antara 1.1052 cm dan 2.3518 cm. Perhitungan *pitch* atau panjang kisi SC dan radius grafit sentral bahan bakar tipe *wallpaper* pada rentang *fraksi packing* TRISO 5.5% dan 30% dirangkum dalam **Tabel 2**. **Tabel 2** menunjukkan radius grafit sentral semakin bertambah seiring dengan meningkatnya *fraksi packing* partikel.

*Pitch* atau panjang kisi SC ( $P_{SC}$ ) dan radius grafit sentral ( $R_C$ ) dapat dihitung dengan mengikuti formula sebagai berikut [10]:

$$P_{SC} = \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3f}} r_T \tag{5}$$

$$R_C = \sqrt[3]{R_z^3 - \frac{N_T}{f} r_T^3} \tag{6}$$

**Tabel 2.** Radius grafit sentral bahan bakar tipe *wallpaper* pada rentang *fraksi packing* TRISO 5.5% dan 30%.

N TRISO	Fraksi <i>packing</i> (f, %)	Pitch ( $P_{sc}$ , cm)	Radius grafit sentral ( $R_c$ , cm)
8.335	5.5	0.192832697	1.105200479
	10	0.157991962	1.980962376
	15	0.13801871	2.182141732
	20	20.125398332	2.270145818
	25	0.116409509	2.319832364
	30	0.109545548	2.351809522

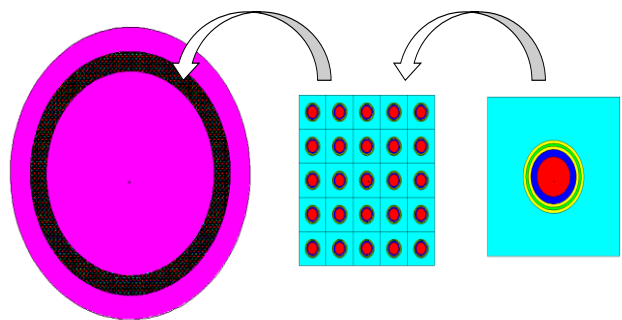
Zona bahan bakar tersusun atas partikel berlapis TRISO yang terdispersi dalam matriks grafit. Setiap bahan bakar *pebble wallpaper* mengandung sekitar 8.335 partikel TRISO. Partikel TRISO sendiri tersusun atas kernel yang berbahan dasar uranium oksida (UO<sub>2</sub>) yang dilapisi oleh empat lapisan dari tiga material isotropik. Setiap lapisan memiliki fungsi spesifik dalam unjuk kerja bahan bakar. Salah satunya adalah mencegah terjadinya

kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Keempat lapisan partikel TRISO adalah lapisan penyangga karbon berpori (*buffer*) yang berfungsi sebagai penyerap kerusakan radiasi dan penyedia ruang untuk gas fisi yang diproduksi selama operasi reaktor, diikuti oleh lapisan piro karbon bagian dalam (IPyC) yang berperan sebagai perintang difusi untuk produk fisi metalik, kemudian lapisan silikon karbida (SiC) yang bertindak sebagai penjamin keketatan dari lepasnya produksi fisi metalik selama kondisi normal maupun kecelakaan serta lapisan piro karbon bagian luar (OPyC) yang menyediakan permukaan tahan dan kuat dalam menjaga lepasnya zat radioaktif dari material matriks. Partikel TRISO dimodelkan sesuai dengan spesifikasi material yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Spesifikasi material partikel TRISO.

Lapisan	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Radius (cm)
Kernel (UO <sub>2</sub> )	10.41	0.0250
<i>Buffer</i> karbon berpori	1.14	0.0340
Karbon pirolitik dalam	1.89	0.0380
Silikon karbida	3.20	0.0415
Karbon pirolitik luar	1.87	0.0455

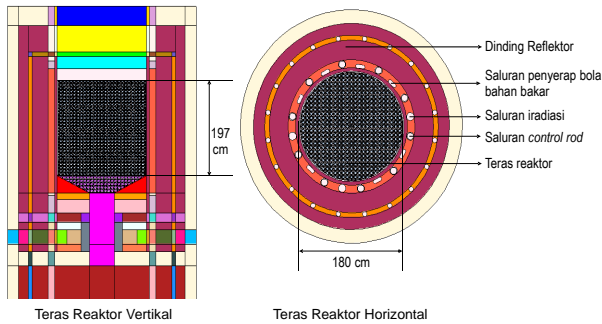
Dalam pemodelan teras reaktor *pebble bed* HTR-10, struktur reaktor harus dimodelkan secara akurat sesuai dengan desain dan spesifikasi geometri sebenarnya. Data-data inputan seperti densitas reflektor di berbagai zona teras reaktor disesuaikan dengan karakteristik asli dari HTR-10. **Gambar 3** mengilustrasikan model MCNPX 2.6.0 bahan bakar tipe *wallpaper*.



**Gambar 3.** Model MCNPX 2.6.0 untuk bahan bakar tipe *wallpaper*

Dalam memodelkan teras reaktor HTR-10, pemuatan bahan bakar *pebble* menjadi satu aspek yang paling kompleks dimana Sekitar 27.000 bahan bakar *pebble* tipe *wallpaper* harus dimuat di dalam teras reaktor. Hal ini disebabkan karena keacakan distribusi bahan bakar di dalam teras.

Secara umum, kebanyakan pemodelan susunan bahan bakar *pebble* dalam teras didekati dengan struktur kisi *body-centered cubic* (BCC), sehingga model kisi ini di pertimbangkan dalam penelitian sebagai solusi untuk mengatasi distribusi stokastik *pebble* di dalam teras reaktor. **Gambar 4** mengilustrasikan model MCNPX 2.6.0 untuk teras reaktor *pebble bed* HTR-10.



**Gambar 4:** Model MCNPX 2.6.0 untuk teras reaktor *pebble bed* HTR-10

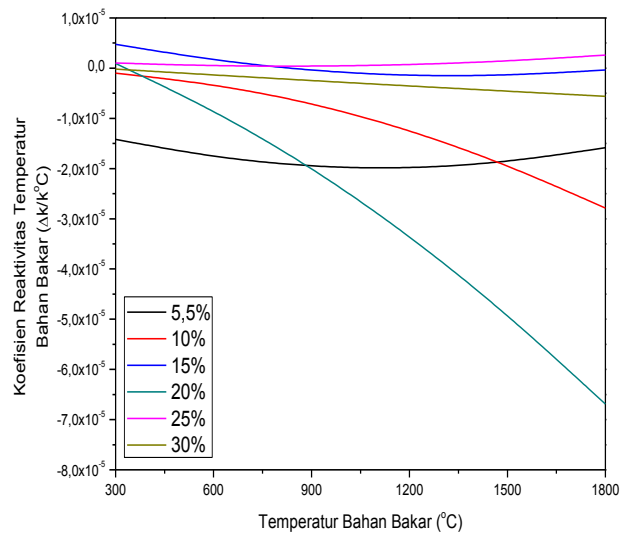
**5. Hasil dan Pembahasan**

Seluruh perhitungan dilakukan menggunakan program transport Monte Carlo MCNPX 2.6.0 pada temperatur 300°C hingga 1.800°C dengan interval 300°C dan fraksi *packing* 5,5%, 10%, 15%, 20%, 25% dan 30%. Opsi KCODE *card* digunakan untuk memperoses 210 siklus dalam MCNP dengan 10 siklus pertama diskip sebelum perhitungan dimulai. Hal ini untuk memastikan bahwa distribusi sumber sudah stabil sehingga total siklus perhitungan yang disimulasikan di dalam MCNP adalah 200 siklus. Setiap siklus terdiri atas 5000 neutron sehingga total keseluruhan neutron yang disimulasikan dalam MCNP adalah 1,000,000 neutron. Tebakan awal untuk  $k_{eff}$  dipilih 1.0. Opsi KSRC digunakan dengan menempatkan sumber neutron di koordinat 2.25 pada arah sumbu *x*, *y* dan *z* di dalam bahan bakar *pebble* tipe *wallpaper*. Sumber nutron di koordinat ini di seleksi untuk menghindari zona grafit sentral dalam bahan bakar *pebble* tipe *wallpaper*.

Dalam studi ini koefisien reaktivitas temperatur dihitung dalam tiga tahap perhitungan, yakni perhitungan koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, reaktivitas temperatur moderator dan kombinasi koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator. Kombinasi koefisien reaktivitas temperatur dihitung untuk mempertimbangkan efek saling keterkaitan dimana kenaikan temperatur bahan bakar akan mengakibatkan kenaikan temperatur moderator.

**5.1 Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar**

Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar merupakan perubahan reaktivitas yang terjadi akibat adanya perubahan temperatur bahan bakar selama reaktor beroperasi. Dalam tahap ini, perhitungan koefisien reaktivitas temperatur dilakukan pada temperatur daerah bahan bakar yang bervariasi dari 300°C hingga 1800°C dengan interval 300°C sedangkan temperatur di daerah lain dijaga konstan pada temperatur 300°C. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar di hitung berdasarkan persamaan (2) di atas yakni dengan menurunkan fungsi gradien reaktivitas untuk setiap fraksi *packing* partikel terhadap temperatur bahan bakar.



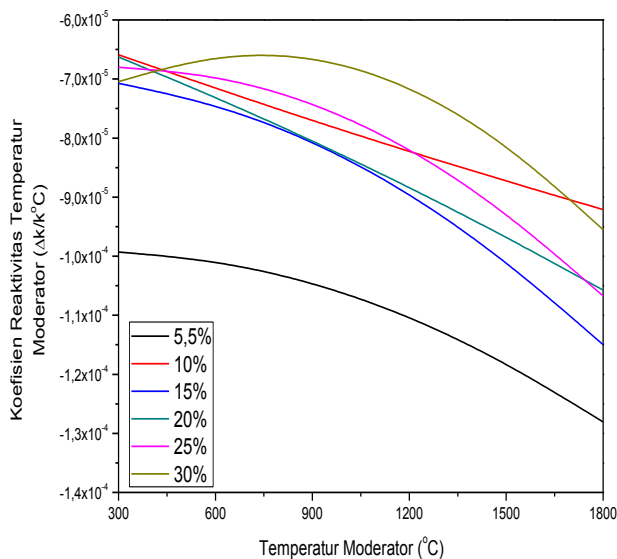
**Gambar 5:** Grafik hubungan koefisien reaktivitas temperatur terhadap temperatur bahan bakar

**Gambar 5** memberikan fakta bahwa koefisien reaktivitas temperatur yang dihasilkan menunjukkan nilai yang negatif pada fraksi *packing* partikel 5.5% sampai dengan 20% dan terus mengalami penurunan seiring dengan berubahnya temperatur bahan bakar. Hasil ini menunjukkan kondisi yang baik di dalam operasi reaktor karena kondisi penurunan reaktivitas pada setiap peningkatan temperatur memberikan dampak yang aman pada reaktor. Pada fraksi *packing* partikel 25% sampai dengan 30% koefisien reaktivitas temperatur memiliki nilai yang positif. Ini berarti kondisi operasi reaktor cukup membahayakan. Keberadaan matriks grafit di dalam bola bahan bakar *pebble* yang semakin terkikis oleh keberadaan grafit sentral atau zona bebas bahan bakar dianggap sebagai penyebabnya.

## 5.2 Koefisien reaktivitas temperatur moderator

Selain bahan bakar, perubahan reaktivitas juga dapat terjadi akibat perubahan temperatur di daerah moderator selama reaktor beroperasi. Dalam tahap ini perhitungan koefisien reaktivitas temperatur reaktor dilakukan pada temperatur daerah bahan bakar yang dijaga konstan 300°C, sedangkan daerah moderator diatur bervariasi dari 300°C hingga 1800°C dengan interval 300°C.

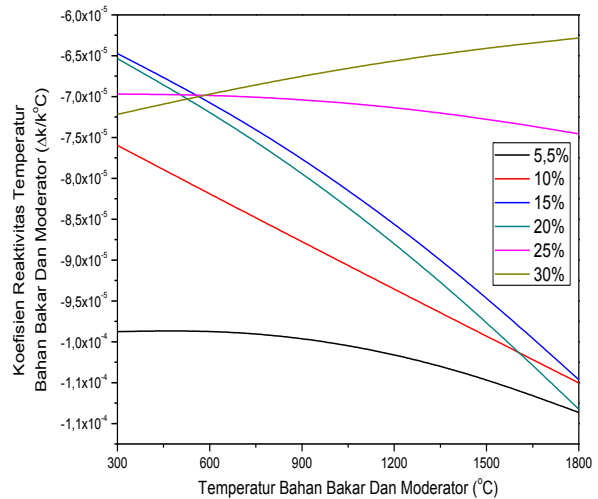
**Gambar 6** mempresentasikan suatu kondisi dimana koefisien reaktivitas temperatur yang dihasilkan menunjukkan nilai yang negatif untuk seluruh fraksi *packing* partikel yang ditetapkan dan terus mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur moderator. Hasil ini menunjukkan kondisi yang cukup baik di dalam operasi reaktor karena kondisi penurunan reaktivitas pada setiap peningkatan temperatur memberikan dampak yang aman pada operasi reaktor.



**Gambar 6:** Grafik koefisien reaktivitas temperatur terhadap perubahan temperatur moderator

## 5.3 Kombinasi koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar dan moderator

Untuk mempertimbangkan efek saling terkait dimana kenaikan temperatur bahan bakar juga dapat berdampak pada peningkatan temperatur moderator maka dilakukan perhitungan koefisien reaktivitas temperatur secara kombinasi untuk berbagai temperatur bahan bakar dan moderator. Pada tahap ini perhitungan koefisien reaktivitas temperatur reaktor dilakukan pada temperatur daerah bahan bakar dan moderator yang bervariasi dari 300°C hingga 1800°C dengan interval 300°C. diperoleh grafik koefisien reaktivitas temperatur seperti ditunjukkan dalam **Gambar 7**.



**Gambar 7.** Grafik koefisien reaktivitas temperatur terhadap temperatur bahan bakar dan moderator

**Gambar 7** menunjukkan koefisien reaktivitas temperatur menunjukkan nilai yang negatif untuk seluruh fraksi *packing* partikel yang ditetapkan pada temperatur 300°C hingga 1800°C. Pada fraksi *packing* partikel 5,5% hingga 20% kondisi koefisien reaktivitas terus mengalami penurunan seiring dengan kenaikan temperatur bahan bakar dan moderator, sedangkan pada fraksi *packing* partikel 25% dan 30% koefisien reaktivitas menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya temperatur bahan bakar dan moderator. Hal ini diperkirakan karena keberadaan matriks grafit untuk memperlambat neutron cepat di dalam bahan bakar *pebble* yang semakin terkikis oleh penempatan zona bebas bahan bakar di pusat *pebble* sehingga mengurangi probabilitas terjadinya proses fisi lebih lanjut.

Meskipun demikian, secara umum operasi reaktor berada pada kondisi aman ditinjau dari hasil perhitungan secara keseluruhan memperlihatkan kondisi cukup baik dengan nilai koefisien reaktivitas temperatur yang negatif untuk seluruh kenaikan temperatur bahan bakar dan moderator

## 6. Kesimpulan

Telah berhasil dilakukan desain neutronik perangkat reaktor *pebble bed* HTR-10 berbahan bakar tipe *wallpaper* dengan memvariasikan radius grafit sentral menggunakan program transport Monte Carlo MCNPX 2.6.0.

Secara umum operasi reaktor diprediksikan memenuhi kriteria desain keselamatan inheren (*inherent safety*) ditinjau dari hasil perhitungan koefisien reaktivitas yang menunjukkan kondisi cukup baik dengan perolehan angka negatif untuk seluruh kenaikan temperatur bahan bakar dan temperatur moderator.

---

### Daftar Pustaka

1. T. S. Rokhmadi., *Analisis Koefisien Reaktivitas Temperatur Moderator PWR Dengan WIMS-ANL*. Prosiding pertemuan dan presentasi ilmiah penelitian dasar ilmu pengetahuan dan teknologi Nuklir, Yogyakarta 10 juli 2007, 186-194. ISSN: 0216-3128
2. B. Rohman., Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, 10(2), 59-70, 2013.
3. A. Marmier, M. A. Fütterer, K. Tuček, J. C. Kuijper, J. Oppe, B. Petrov, J. Jonnet, J. L. Kloosterman dan B. Boer. Fuel Cycle Investigation for Wallpaper-Type HTR Fuel. *Nuclear Technology*, 181(2), 317-330, 2013.
4. F. Aziz dan A. N. Lasman. *Analisis Pasca-Kritikalitas Pertama Reaktor Temperatur Tinggi HTR-10 China*. Prosiding Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir XII, Jakarta, 4-5 Juli 2001, 1-17. ISSN: 0853-9812.
5. Z. Zuhair, S. Suwoto dan P. Supriatna. Studi Model Heksagonal MCNP5 Dalam Perhitungan Benchmark Fisika Teras HTR-10. *Jurnal Matematika dan Sains*, 17(2), 61-70, 2013
6. Z. Wu, D. Lin dan D. Zhong. The design features of the HTR-10. *Nuclear Engineering and Design*, 218(3), 25-32, 2002.
7. B. Boer, D. Lathouwers, J. L. Kloosterman, T. H. J. J. Van Der Hagen dan G. Strydom. Validation of the DALTON-THERMIX code system with transient analyses of the HTR-10 and application to the PBMR. *Nuclear Technology*, 170(2), 306-321, 2010.
8. S. Zuhair, P. I. Yazid dan J. S. Pane. Studi model benchmark mcnp6 dalam perhitungan reaktivitas batang kendali htr-10. *GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir*, 19(2), 95-103, 2016.
9. A. Marmier, M. A. Fütterer, K. Tuček, H. De Haas, J. C. Kuijper dan J. L. Kloosterman. Revisiting the concept of HTR wallpaper fuel. *Nuclear Engineering and Design*. 240, 2485–2492, 2010.
10. F. J. Wols, J. L. Kloosterman, D. Lathouwers dan T. H. J. J. Van der Hagen. Analysis of the running-in phase of a Passively Safe Thorium Breeder Pebble Bed Reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 81, 227-239, 2015.