

ANALISIS KARAKTERISTIKA DISTRIBUSI TEMPERATUR BAHAN BAKAR *PEBBLE* DI TERAS RGTT200K PADA KONDISI TUNAK

Sudarmono

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN
Gedung 80, Kawasan PUSPIPTEK – Serpong 15310
aksel@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS KARAKTERISTIKA DISTRIBUSI TEMPERATUR BAHAN BAKAR *PEBBLE* di TERAS RGTT200K PADA KONDISI TUNAK. Seiring dengan pengembangan konsep desain RGTT200K, analisis karakteristik temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K kondisi tunak (*steady state*) telah dilakukan. Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui efektifitas ketahanan bahan bakar *pebble* pada operasi daya nominal 200 MWth dalam kondisi tunak, sehingga akan sangat bermanfaat pada tahap desain selanjutnya. Metodologi analisis dilakukan dengan menggunakan program komputer THERMIX, dengan cara membagi teras reaktor menjadi 50 komponen untuk mewakili posisi berbagai komposisi material yang berbeda, dan memodelkan bahan bakar *pebble* menjadi 5 daerah. Kalkulasi dilakukan berdasarkan pada data masukkan pemodelan, parameter reaktor, spesifikasi teras, dan spesifikasi bahan bakar *pebble* serta data partikel berlapis TRISO RGTT200K. Hasil analisis menunjukkan bahwa perbedaan maksimum distribusi temperatur bahan bakar maksimum pada arah aksial dan radial masing-masing sebesar 257,2oC, 113oC. Hasil analisis terhadap temperatur dua dimensi elemen bakar *pebble* yang berisi partikel TRISO dapat secara efektif menahan semua produk fisi radioaktif, karena masih di bawah temperatur 1600oC yang dipilih sebagai temperatur pembatas elemen bakar.

Kata kunci: temperatur bahan bakar *pebble*, RGTT200K, kondisi tunak

ABSTRACT

ANALYSIS OF *PEBBLE* FUEL ELEMENT TEMPERATURE DISTRIBUTION CHARACTERISTIC IN RGTT200K REACTOR CORE AT STEADY-STATE CONDITION. Along with the development of RGTT200K design concepts, analysis of the characteristics of the *pebble* fuel temperature on RGTT200K reactor core at steady state condition has been done. The purpose of this analysis was to determine the effectiveness of the *pebble* fuel's resistance to nominal power 200 MWth in steady state condition; therefore it will be very useful in the next design phase. Methodology for the analysis is done using THERMIX code, by dividing the reactor core into 50 components to represent the position of the various compositions of different materials, and models the fuel *pebble* into 5 regions. Calculations conducted based on input data modeling, the reactor parameters, reactor specifications, *pebble* fuel specifications and RGTT200K TRISO-coated particles data. The analysis showed that the maximum difference in the maximum fuel temperature distribution in the axial and radial directions respectively at 257.2oC, 113oC. Calculation results show that the two-dimensional of *pebble* fuel elements temperature contain TRISO particles can effectively restrain all radioactive fission products, because it is still under temperature 1600oC selected as limiting fuel element temperatures.

Keywords: *pebble* fuel element temperature, RGTT200K, steady-state condition.

PENDAHULUAN

Konseptual desain RGTT200K adalah reaktor gas temperatur tinggi berdaya 200MW termal untuk kogenerasi. Selain digunakan untuk menghasilkan listrik, panas yang dihasilkan dimanfaatkan untuk produksi hidrogen ataupun desalinasi [1].

Bidang Pengembangan Reaktor di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) mempunyai tugas pokok melaksanakan kegiatan litbang desain konseptual teras RGTT200K menggunakan bahan bakar partikel TRISO berbasis kernel UO₂ dalam bahan bakar *pebble*[2]. Kernel tersebut merupakan komposisi gabungan nuklida (U²³⁵, U²³⁶, O¹⁶, B¹⁰ dan B¹¹) berlapis TRISO (TRIStructural-ISOtropic) material, yang selanjutnya disebut dengan partikel TRISO. Desain

konseptual teras merupakan tahap awal yang harus dilakukan untuk pengembangan desain teras RGTT200K yang lebih rinci.

Sesuai dengan perencanaan kegiatan konseptual desain RGTT200K, analisis distribusi temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K diperlukan untuk mempelajari karakteristik reaktor pada kondisi tunak. Pada penelitian sebelumnya mengenai perpindahan panas telah dilakukan perhitungan distribusi *solid material* di teras RGTT200K[2], pada penelitian ini lebih ditekankan pada perhitungan dan analisis distribusi temperatur bahan bakarnya. Penelitian serupa telah dilakukan pada desain PLTN demonstrasi Cina HTR-PM (*High Temperature Gas Cooled Reactor Pebble bed Module*) 200MWth [6].

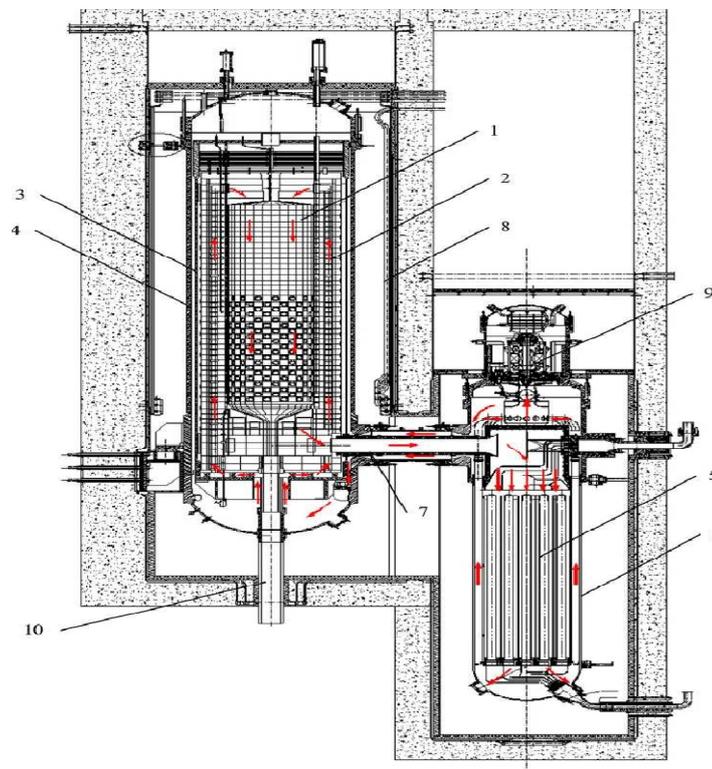
Seiring dengan berlangsungnya operasi reaktor, tingkat daya yang dapat dicapai oleh desain teras RGTT200K dibatasi oleh besarnya nilai temperatur bahan bakar. Apabila RGTT200K dioperasikan pada tingkat daya yang terlalu tinggi dapat menyebabkan temperatur bahan bakar di dalam teras reaktor naik. Besarnya temperatur bahan bakar sangat ditentukan oleh fluks panas lokal, dimana pembangkitan fluks panas yang tinggi akan mengakibatkan perubahan kesetimbangan panas yang pada akhirnya akan mengakibatkan perubahan besarnya nilai temperatur dan dapat sampai melewati batas-batas temperatur yang masih dapat dianggap aman[4]. Pada kondisi seperti inilah maka analisis karakteristik temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K kondisi tunak (*steady state*) perlu dilakukan[5]. Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui efektifitas ketahanan bahan bakar *pebble* pada operasi daya nominal 200 MWth dalam kondisi tunak sehingga akan sangat bermanfaat pada tahap desain selanjutnya, di samping untuk meneliti dan mengikuti kemajuan teknologi kunci skala besar industri [6]. Kalkulasi dilakukan dengan program komputer THERMIX yang merupakan salah satu program perhitungan parameter termohidrolika di dalam program *Very Superior Old Program (VSOP)* Kalkulasi ini didasarkan pada data masukkan pemodelan teras dan bahan bakar *pebble*, parameter reaktor, dan spesifikasi teras serta spesifikasi bahan bakar *pebble* dan partikel berlapis TRISO RGTT200K[8,9]. Selanjutnya hasil kalkulasi dibandingkan dengan batas maksimum temperatur bahan bakar bola yang di ijin, yaitu 1600°C. Hal ini dipilih sebagai pembatas sehingga integrasi bahan bakar tetap terjaga dan tidak melepaskan radioisotop nuklida Cs-137 yang membahayakan bagi tubuh manusia[5,6]. Hasil simulasi yang diperoleh dalam makalah ini masih hasil awal dan pekerjaan penelitian lebih lanjut, seperti perbandingan dengan data eksperimental atau dengan beberapa *code CFD (Computational Fluid Dynamics)* komersial, perlu dilaksanakan dalam rangka untuk mempelajari karakteristik temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K kondisi tunak (*steady state*) di masa mendatang.

KONSEPTUAL DESAIN RGTT200K

Konseptual desain RGTT200K merupakan salah satu sistem pembangkit energi yang memiliki efisiensi energi paling besar, paling ekonomis, tingkat keselamatan inheren yang tinggi dan bersih. Desain konseptual teras RGTT200K secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi termal total sistem energi nuklir serta dapat diandalkan sebagai salah satu solusi penurunan gas karbon dioksida global karena sebagai penghasil energi yang sangat efisien dan ramah lingkungan. Reaktor ini merupakan pengembangan desain konseptual reaktor kogenerasi dengan tingkat daya menengah yang berpendingin gas helium[1]. Mekanisme pemuatan bahan bakar selama reaktor beroperasi berlangsung sebagai berikut, bahan bakar bola secara kontinu diambil dari bagian bawah tabung dengan laju pengambilan mencapai ribuan bola perhari, bola bahan bakar yang masih baik akan dikembalikan ke dalam bejana reaktor dari bagian atas. Dengan demikian, posisi bola bahan bakar tidak statis tetapi bergerak secara perlahan dari atas ke arah bawah bejana.

Desain konseptual teras RGTT200K memiliki kemiripan dengan Gambar desain PLTN demonstrasi Cina HTR-PM (*High Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble bed Module*) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Spesifikasi desain RGTT200K adalah dengan menggunakan bahan bakar

pebble yang terdiri atas partikel bahan bakar berlapis *TR*istructural-*IS*Otropic (TRISO). RGTT200K adalah reaktor *pebble bed* dengan daya 200 MWth, yang terhubung ke satu generator uap-turbin dengan efisiensi sekitar 42% [6]. Reaktor ini pada dasarnya terdiri atas sebuah bejana reaktor (*Reactor Pressure Vessel-RPV*), generator (*steam generator pressure vessel-SGPV*), dan sebuah *hot-gas duct pressure vessel (HDPV)* koaksial horizontal, serta komponen-komponen internal RPV dan SGPV yang dipasang dalam ruang pelindung beton. Blower helium utama dipasang pada bagian atas SGPV. Helium meneruskan panas yang dibangkitkan di dalam teras reaktor menuju ke untai sekunder di dalam generator uap untuk menghasilkan uap *superheated* tekanan tinggi, yang menggerakkan turbin uap untuk membangkitkan listrik sekitar 200 MWth. Pada operasi normal, sistem pengambilan panas sisa (*residual Heat Removal System-RHRS*), yang dirancang sebagai suatu sistem pasif, dapat mengambil panas peluruhan dari teras ke *heat sink*, sehingga menjamin integritas termal bahan bakar, RPV dan ruang generator uap. Selain itu, di dalam dinding beton ruang reaktor dan ruang generator uap, suatu sistem pendingin air dipasang untuk menjaga temperatur dinding di bawah 100°C, sehingga kekuatan dan integritas ruang beton terjamin. Teras RGTT200K memiliki diameter 300 cm dan tinggi 943 cm. Komposisi bahan bakar uranium di teras RGTT200K terdiri dari 359.548 bahan bakar *pebble* yang terdistribusi secara acak di dalam teras reaktor. Dengan volume teras 66,657 m³ dan densitas daya 3 W/cm³, RGTT200K dapat menghasilkan daya sebesar 200 MWth dengan temperatur *outlet* teras rerata 950°C dan temperatur *inlet* helium rerata 600°C. Struktur grafit yang mengelilingi teras memiliki ketebalan radial 100 cm serta aksial total bagian atas dan bagian bawah 750 cm, sedangkan ruang kavitas yang berada di atas teras mempunyai tinggi 50 cm.

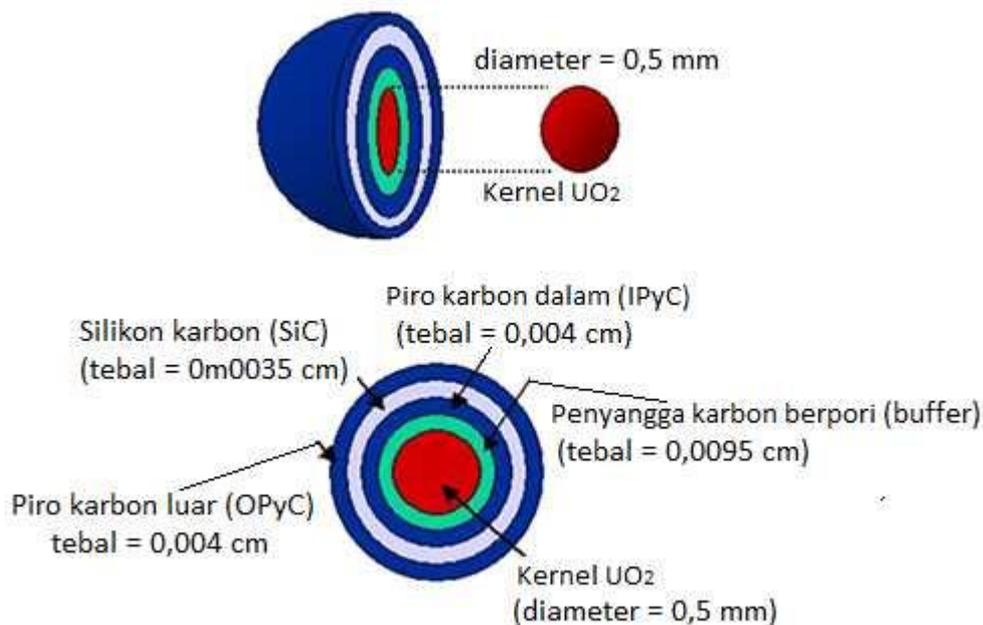


Gambar 1. Tampang lintang loop primer RGTT200K [1,6].

Keterangan: 1. teras reaktor; 2. reflektor samping (*side reflector*) dan perisai termal karbon (*carbon thermal shield*); 3. *core barrel*; 4. bejana tekan reaktor (*reactor pressure vessel/RPV*); 5. Pembangkit uap (*steam generator*); 6. Bejana pembangkit uap (*steam generator vessel*); 7. *coaxial gas duct*; 8. *water-cooling panel*; 9. blower; 10. *fuel*

discharging tube: Selain itu, terdapat 30 kanal pendingin yang terletak di samping teras dan tabung pemuatan bahan bakar dengan diameter 6,5 cm yang diletakkan pada bagian atas di tengah teras reaktor, sedangkan tabung pengambilan bahan bakar terletak pada bagian bawah teras reaktor.

Untuk setiap bahan bakar *pebble*, berisikan 15.000 buah kernel partikel bahan bakar berlapis yang dilapisi oleh TRISO. Partikel bahan bakar berlapis, seperti ditunjukkan pada Gambar 2, dengan diameter 0,92 mm disebar di dalam matriks grafit dengan diameter 5,0 cm untuk membentuk zona bahan bakar, dan *shell* luar dengan ketebalan 0,5 cm merupakan suatu zona bebas bahan bakar. Pemuatan logam berat, yaitu pengayaan setiap elemen bakar diatur 7 g. Temperatur *outlet* teras rata-rata adalah 950°C, sedangkan temperatur helium *inlet* dingin rata-rata adalah 600°C.



Gambar 2 Bahan bakar *pebble* untuk RGTT200K [1.6]

PROGRAM KOMPUTER THERMIX

Program komputer THERMIX adalah bagian dari *code Very Superior Old Program (VSOP)* yang merupakan salah satu program perhitungan parameter termohidrolika. Program komputer tersebut selain terdapat modul perhitungan juga terdapat beberapa data pustaka tampang lintang di dalamnya. Hal ini dapat pula digunakan untuk menganalisis parameter termohidrolika berbagai macam jenis dan bentuk teras reaktor. Program komputer ini awalnya dikembangkan oleh KFA-Julich^[10]. Korelasi dan parameter utama dari berbagai sifat-sifat material yang berbeda dalam program komputer THERMIX telah diuji dengan menggunakan eksperimen di Jerman sejak abad lalu dan telah disempurnakan untuk diterapkan pada desain beberapa reaktor HTR; seperti AVR, THTR, HTR-500 dan HTR-Module. Selain itu, program komputer THERMIX juga digunakan dalam desain PBMR Afrika Selatan, HTR-10 Cina, dan HTR-PM sebagai suatu alat analisis termohidrolika yang penting [6].

Struktur program komputer THERMIX merupakan perhitungan perpindahan panas secara konduksi dan konveksi pada kondisi tunak dan transien. Persamaan dasar dan teknik solusi program komputer THERMIX, dibahas secara detil dalam referensi [8]. Program komputer THERMIX tersusun oleh 12 modul, 5 modul diantaranya adalah modul TRIGIT, BIRGIT, LIFE dan VSOP serta ZUT.

Program ini memerlukan data masukkan pemodelan reaktor dan bahan bakar, parameter reaktor, spesifikasi teras dan bahan bakar *pebble* serta partikel bahan bakar berlapis TRISO[8,9] .

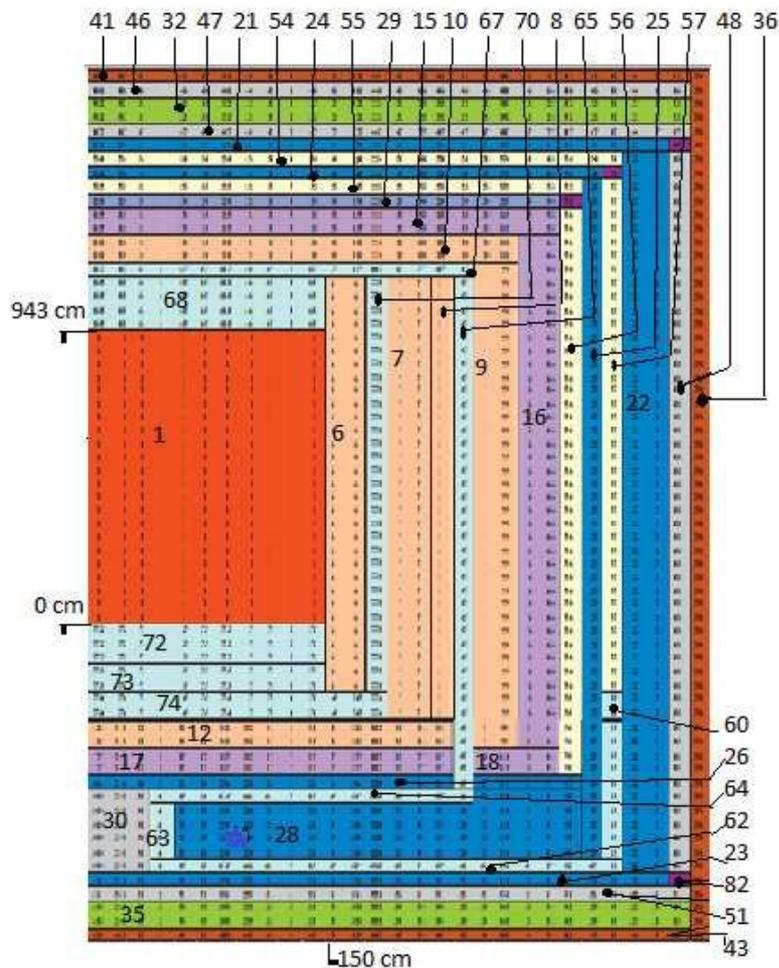
METODOLOGI

Analisis karakteristik temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K kondisi tunak (*steady state*) diperoleh dengan menggunakan program komputer THERMIX, dengan terlebih dahulu melakukan pemodelan. Nodalisasi model perhitungan distribusi temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K arah radial dan aksial di seluruh teras dilakukan sesuai dengan pemodelan yang dilakukan oleh Yanhua Zhenga dkk [6], menggunakan data input (*input deck*) RGTT200K seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2. Struktur input data program THERMIX antara lain terdiri dari data desain elemen bakar, desain jenis dan varian elemen bakar, serta desain teras. Analisis dilakukan melalui serangkaian langkah berikut ini:

1. a. Memodelkan reaktor RGTT200K, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Reaktor dibagi menjadi 50 komponen untuk mewakili berbagai komposisi material yang berbeda, seperti *pebble bed*, reflektor, bata karbon, *barrel* teras, RPV, dan panel pendingin. *Pebble bed*, reflektor, dan ruang gas diperlakukan sebagai media yang homogen.

b. Memodelkan bahan bakar *pebble* dibagi menjadi 5 daerah, daerah pertama adalah lapisan grafit, sedangkan empat daerah lainnya adalah bagian bahan bakar dengan partikel berlapis di bagian dalam matriks grafit. Diameter bagian dalam dari lima daerah ini masing-masing adalah 5,0 cm; 3,0 cm; 1.0 cm; 0.3 cm dan daerah pusat.



Gambar 3. Model perhitungan RGTT200K dalam koordinat r-z.

Keterangan: 1. Teras reaktor; 6-12 reflektor grafit; 15-18 *carbon brick*; 21-23 *reactor pressure vessel*; 24-29 *core barrel* dan *metal internals*; 30 *fuel discharge tube*; 33 dan 35 isolasi termal; 36, 41 dan 43 *outer boundary*; 46-48 dan 51 celah udara (*air gap*); 54-57 *helium gap*; 60 *core inlet cavity*; 61 *core inlet channel*; 62 *RPV bottom cavity*; 63 *RPV bottom flow passage*; 64 *core bottom cavity*; 65 kanal pendingin; 67; 67 *cold helium plenum*; 68 *top reflector with flow passage*; 70 kanal batang kendali; 72 dan 73 *bottom reflector with flow passage*; 74 *hot helium plenum*. [6]

- Menentukan parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K sebagai data masukan program komputer THERMIX seperti pada Tabel 1 sebagai berikut :

Tabel 1. Parameter reaktor dan spesifikasi teras RGTT200K

PARAMETER	NILAI
A).Parameter reaktor:	
Daya termal (MWt)	200
Volume teras (m ³)	66,657
Temperatur <i>inlet</i> teras (°C)	600
Temperatur <i>outlet</i> teras (°C)	950
Tekanan He (MPa)	7
Aliran massa pendingin (kg/s)	120
Densitas pendingin He pada 273,16K, 10 ⁵ Pa (g/cm ³)	1,78×10 ⁻⁴
B). Spesifikasi teras:	
Tinggi teras (m)	9,43
Radius teras (m)	1,5
Jumlah <i>pebble</i> per m ³	5.394
Jumlah <i>pebble</i> dalam teras	359.548
Fraksi <i>packing pebble</i> dalam teras (%)	61

- Menentukan spesifikasi bahan bakar *pebble* dan partikel berlapis TRISO RGTT200K, sebagai data masukan program komputer THERMIX seperti pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. spesifikasi bahan bakar *pebble* dan partikel berlapis TRISO RGTT200K

PARAMETER	NILAI
A) Bahan bakar <i>pebble</i> :	
Diameter <i>pebble</i> (cm)	6,0
Diameter zona berbahan bakar (cm)	5,0
Ketebalan <i>shell</i> grafit (cm)	0,5
Densitas <i>shell</i> grafit (g/cm ³)	1,75
Impuritas boron dlm <i>shell</i> grafit (ppm)	0,5
Fraksi <i>packing pebble</i> dalam teras (%)	61

B) Partikel berlapis TRISO:	
a. Kernel bahan bakar	
Radius bahan bakar kernel (cm)	0,025
Densitas bahan bakar kernel (g/cm ³)	10,4
Pengkayaan ²³⁵ U (%)	10
Impuritas boron dalam kernel (ppm)	0,5
b. <i>coating</i>	
Material <i>coating</i>	C/IPyC/SiC/OPyC
Ketebalan <i>coating</i> (cm)	0,0095/0,004/0,0035/0,004
Densitas <i>coating</i> (g/cm ³)	1,05/1,9/3,18/1,9

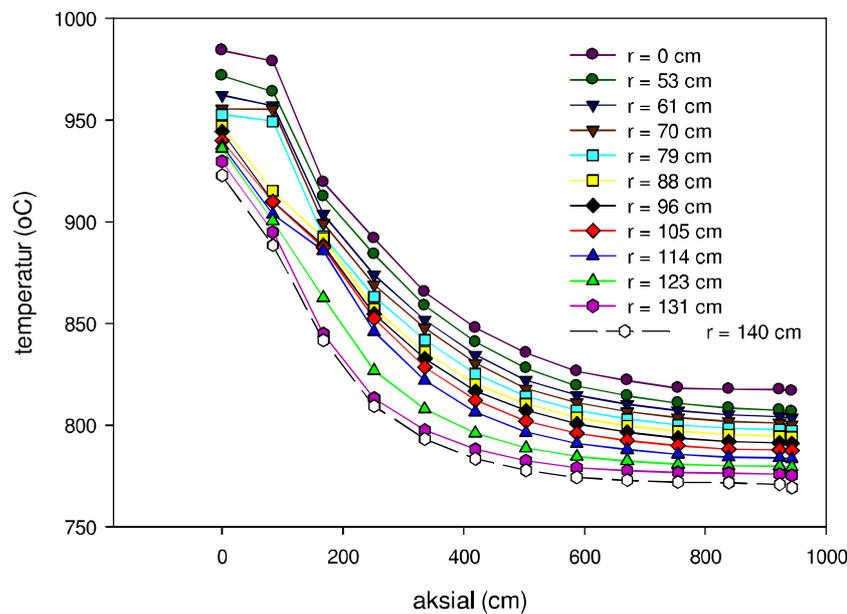
4. Melakukan kalkulasi dengan program komputer THERMIX berdasarkan pada data masukkan pemodelan, parameter reaktor, spesifikasi teras, dan spesifikasi bahan bakar *pebble* serta partikel berlapis TRISO RGTT200K.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui analisis karakteristik temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K kondisi tunak, dilakukan dengan menganalisis hasil kalkulasi temperatur bahan bakar dengan arah aksial dan radial. Kalkulasi dilakukan berdasarkan pada puncak daya dengan densitas daya maksimum 3 MWt/m³, dan pemodelan desain konseptual yang telah dibuat pada reaktor HTR-PM[6]. Berdasarkan pengalaman, temperatur bahan bakar *pebble* pada eksperimen yang dilakukan di Jerman menunjukkan bahwa bahan bakar *pebble* yang mengandung partikel TRISO mengalami kegagalan pada uji pemanasan temperatur sebesar 1600°C[5]. Pengalaman penelitian sebelumnya pada modul HTR Jerman dan PBMR Afrika Selatan, menunjukkan bahwa kegagalan bahan bakar *pebble* terjadi pada temperatur maksimum sebesar 1472°C dan 1485°C [11]. Berdasarkan pada penelitian tersebut, temperatur bahan bakar *pebble* sebesar 1600°C dipilih dan diterapkan sebagai pembatasan temperatur maksimum yang diizinkan sehingga integrasi bahan bakar tetap terjaga dan tidak melepaskan radioisotop nuklida Cs-137 yang membahayakan bagi tubuh manusia[5,6]. Untuk program komputer THERMIX, sifat-sifat material seperti densitas helium, viskositas dinamis, kapasitas panas spesifik, konduktivitas panas bahan bakar *pebble* diintegrasikan ke dalam *program*.

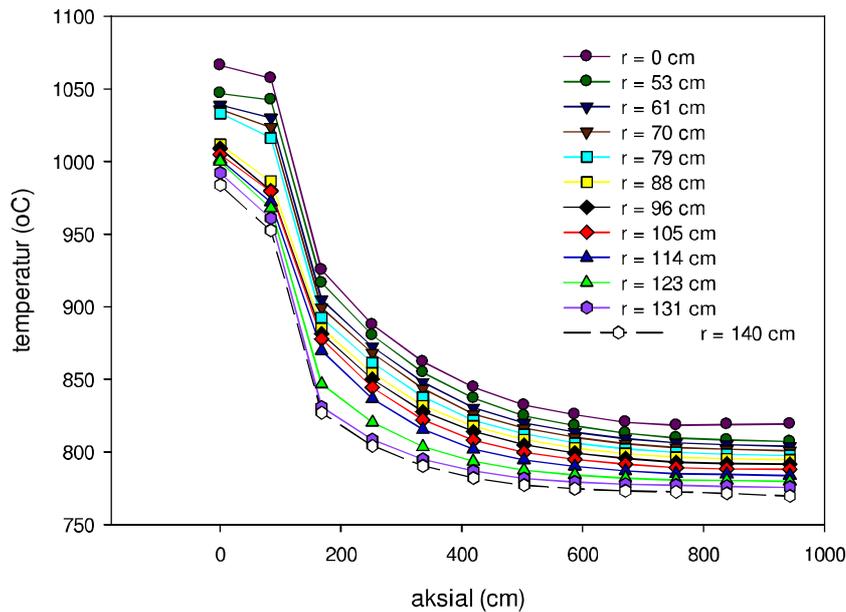
Pemodelan kalkulasi RGTT200K, telah dilakukan berdasarkan pendekatan dan simplifikasi yang logis, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Asumsi yang digunakan adalah bahwa bola absorber dikeluarkan dari teras reaktor, dan posisi titik $z = 0$ cm terletak di daerah pendingin helium keluar teras. Selanjutnya titik $z = 587$ cm terletak di daerah pendingin helium antara sisi masuk dan keluar teras dan titik $z = 943$ cm terletak di daerah pendingin masuk ke teras. Hasil analisis karakteristik temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K kondisi tunak yang berada pada masing-masing posisi yaitu 6 cm (lapisan grafit), dan 3 cm (antara pusat dan lapisan grafit) dan pusat bahan bakar *pebble* sebagai fungsi jarak aksial pada berbagai radius di dalam teras, ditunjukkan pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6. Profil distribusi temperatur yang di peroleh pada ke tiga gambar tersebut adalah konsisten yaitu nilai temperatur meningkat sebagai fungsi jarak aksial. Jika profil/trend distribusi temperatur bahan bakar *pebble* pada berbagai radius di dalam teras reaktor yang diperoleh dari kalkulasi program komputer THERMIX, dibandingkan dengan data hasil profil distribusi temperatur bahan bakar *pebble* yang dilakukan dengan menggunakan *code* ATTICA3D pada HTR-PM [6], menunjukkan konsistensi yang baik diantara dua *software* tersebut.

Hasil analisis karakteristik temperatur grafit bahan bakar *pebble* sebagai fungsi aksial pada berbagai radius di dalam teras RGTT200K kondisi tunak, ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil distribusi temperatur grafit bahan bakar *pebble* terhadap jarak aksial

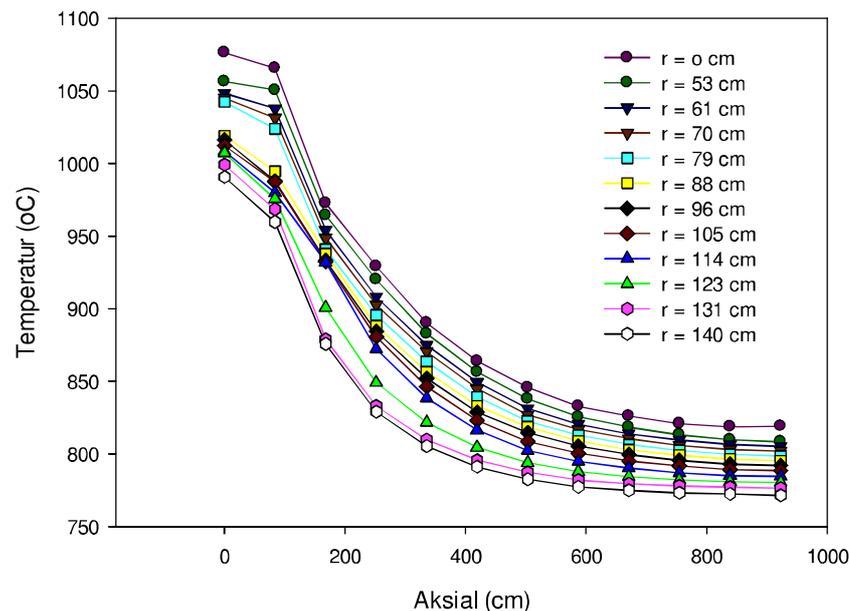
Dari profil distribusi temperatur lapisan grafit bahan bakar *pebble* tersebut terlihat bahwa nilai temperatur yang diperoleh mengalami peningkatan sebagai fungsi jarak aksial dan terdapat perbedaan yang teramati baik di bagian pendingin helium masuk, tengah dan keluar teras. Untuk daerah pendingin keluar teras, besarnya temperatur di pusat ($z=0$ cm, $r=0$ cm), tengah ($z=0$ cm, $r=79$ cm) dan pinggir teras ($z=0$ cm, $r=140$ cm), masing-masing sebesar $984,2^{\circ}\text{C}$, $952,8^{\circ}\text{C}$ dan $922,8^{\circ}\text{C}$. Untuk di titik ($z = 0$ cm, $r = 114$ cm) dan titik ($z = 0$ cm, $r = 123$ cm), diperoleh nilai temperatur masing-masing yaitu sebesar $937,7^{\circ}\text{C}$ dan $936,1^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya di daerah pendingin helium antara masuk dan keluar teras, besarnya temperatur di pusat ($z=587$ cm, $r=0$ cm), tengah ($z=587$ cm, $r=79$ cm) dan pinggir teras ($z=587$ cm, $r=140$ cm), diperoleh masing-masing sebesar $826,5^{\circ}\text{C}$, $807,3^{\circ}\text{C}$ dan $774,4^{\circ}\text{C}$. Untuk di titik ($z = 587$ cm, $r = 114$ cm) dan titik ($z = 587$ cm, $r = 123$ cm), diperoleh nilai temperatur masing-masing yaitu sebesar $791,1^{\circ}\text{C}$ dan $784,6^{\circ}\text{C}$. Nilai gradien temperatur di daerah *outlet* pendingin ke arah radial baik di pusat $\Delta T_{R=0}$, tengah $\Delta T_{R=79}$ dan pinggir $\Delta T_{R=140}$ di teras masing-masing, yaitu sebesar $167,4^{\circ}\text{C}$, $155,6^{\circ}\text{C}$ dan $153,4^{\circ}\text{C}$. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh karena perbedaan posisi. Panas yang dibangkitkan ditransfer oleh pendingin helium dengan arah aliran dari atas ke bawah. Perpindahan panas di dalam teras reaktor berlangsung secara radiasi serta konveksi dan konduksi panas.



Gambar 5. Distribusi temperatur bakar *pebble* terhadap jarak aksial

Hasil analisis karakteristik temperatur di bagian antara pusat dan lapisan grafit dalam bahan bakar *pebble*, sebagai fungsi aksial pada berbagai radius di dalam teras RGTT200K kondisi tunak ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil karakteristik temperatur tersebut terlihat sama dengan pola profil meningkatnya distribusi temperatur yang diperoleh dari lapisan grafit, hal ini menunjukkan konsistensi yang baik sebagai fungsi jarak aksial. Selanjutnya terdapat perbedaan yang teramati pada bagian daerah pendingin helium masuk, tengah dan keluar teras. Pada daerah pendingin keluar teras, besarnya temperatur di pusat ($z = 0 \text{ cm}$, $r = 0 \text{ cm}$), tengah ($z = 0 \text{ cm}$, $r = 79 \text{ cm}$) dan pinggir teras ($z = 0 \text{ cm}$, $r = 140 \text{ cm}$), masing-masing sebesar $1066,2^\circ\text{C}$, $1033,2^\circ\text{C}$ dan $952,5^\circ\text{C}$. Untuk di daerah pendingin helium antara masuk dan keluar teras, besarnya temperatur di pusat ($z = 587 \text{ cm}$, $r = 0 \text{ cm}$), tengah ($z = 587 \text{ cm}$, $r = 79 \text{ cm}$) dan pinggir teras ($z = 587 \text{ cm}$, $r = 140 \text{ cm}$), masing-masing sebesar $825,7^\circ\text{C}$, $806,1^\circ\text{C}$ dan $774,6^\circ\text{C}$. Demikian pula nilai temperatur di titik ($z = 755 \text{ cm}$, $r = 0 \text{ cm}$) dan titik ($z = 755 \text{ cm}$, $r = 79 \text{ cm}$) serta ($z = 755 \text{ cm}$, $r = 140 \text{ cm}$), masing-masing sebesar $818,4^\circ\text{C}$; $799,6^\circ\text{C}$, dan $772,5^\circ\text{C}$. Nilai gradien temperatur di daerah *outlet* pendingin ke arah radial baik di pusat $\Delta T_{R=0}$, tengah $\Delta T_{R=79}$ dan pinggir $\Delta T_{R=140}$ di teras masing-masing sebesar 247°C , $235,6^\circ\text{C}$ dan 183°C .

Hasil analisis karakteristik temperatur di bagian pusat *pebble bed* sebagai fungsi aksial pada berbagai radius di dalam teras RGTT200K kondisi tunak, ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil distribusi temperatur pusat *pebble* bed terhadap jarak aksial

Distribusi temperatur pada daerah pendingin helium masuk, tengah dan keluar teras memiliki kecenderungan yang sama, terjadi tren peningkatan distribusi temperatur. Untuk daerah pendingin helium keluar teras, besarnya temperatur di pusat ($z = 0$ cm; $r = 0$ cm), tengah ($z = 0$ cm; $r = 79$ cm) dan pinggir ($z = 0$ cm, $r = 140$ cm) teras, masing-masing sebesar $1076,3^{\circ}\text{C}$, $1042,5^{\circ}\text{C}$ dan $990,7^{\circ}\text{C}$. Untuk titik ($z = 0$ cm, $r = 131$ cm) dan ($z = 587$ cm, $r = 131$ cm) diperoleh nilai temperatur masing-masing sebesar $999,2^{\circ}\text{C}$ dan 782°C . Selanjutnya di daerah pendingin helium antara sisi masuk dan keluar teras, temperatur di pusat ($z = 587$ cm; $r = 0$ cm), di tengah ($z = 587$ cm; $r = 79$ cm) dan di pinggir ($z = 587$ cm; $r = 140$ cm) teras, masing-masing sebesar $832,7^{\circ}\text{C}$, $812,7^{\circ}\text{C}$ dan $777,3^{\circ}\text{C}$. Nilai gradien temperatur di daerah *outlet* pendingin ke arah radial baik di posisi pusat $\Delta T_{R=0}$, tengah $\Delta T_{R=79}$ dan pinggir $\Delta T_{R=140}$ teras masing-masing sebesar $257,2^{\circ}\text{C}$, $243,9^{\circ}\text{C}$ dan $219,3^{\circ}\text{C}$. Dari komparasi hasil analisis karakteristik temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K kondisi tunak, seperti yang di tunjukkan pada Gambar 4, 5, dan 6 terdapat konsistensi *trend/profil* distribusi temperatur. bahan bakar bola di teras. Hasil karakteristik temperatur menunjukkan adanya peningkatan sebagai fungsi ketinggian arah aksial.

KESIMPULAN

Hasil analisis karakteristik distribusi temperatur di bagian pusat bahan bakar *pebble* sebagai fungsi aksial pada berbagai radius di dalam teras RGTT200K kondisi tunak, menunjukkan temperatur maksimum bahan bakar *pebble* yang di peroleh sebesar $1076,3^{\circ}\text{C}$. Temperatur ini tidak melewati batas-batas temperatur yang masih dapat dianggap aman yaitu sebesar 1600°C , yang dipilih sebagai pembatas agar integrasi bahan bakar tetap terjaga, dan tidak melepaskan radioisotop nuklida Cs-137 yang membahayakan bagi tubuh manusia[3,4].

Hasil perbedaan maksimum temperatur pada analisis karakteristik distribusi temperatur bahan bakar *pebble* di teras RGTT200K kondisi tunak arah aksial, baik untuk di bagian pusat dan di bagian antara sisi masuk dan keluar pendingin helium, maupun di pinggir teras, sebesar $257,2^{\circ}\text{C}$, sedangkan perbedaan maksimum temperatur ke arah radial sebesar 113°C .

DAFTAR PUSTAKA

1. Dhandhang Purwadi, M., “Desain Konseptual Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT”, Prosiding Seminar TKPFN-16, ITS Surabaya, 2010.
2. Sudarmono,;”Analisis Perpindahan Panas Teras RGTT200K” diajukan pada Jurnal Teknologi Bahan bakar Nuklir”, 2013.
3. Mohammad Dhandhang Purwadi,; “Optimasi Faktor Utilisasi Energi Termal Desain Konseptual Sistem RGTT 200K”, Jurnal Teknologi Reaktor Tri Dasa Mega, Februari 2012
4. Ir. Prayoto M.Sc., Ph.D, “Pembangkitan Panas Dalam Reaktor” Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, 1978.
5. IAEA-TECDO-988, “High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Development”, Proceedings of a Technical Committee Meeting, Johannesburg-South Africa, 13-15 November 1996.
6. Yanhua Zheng., et all, “Thermal Hydraulic Analysis of a *Pebble*-Bed Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor with ATTICA3D and THERMIX Codes”. Nuclear Engineering and Design, May 2011.
7. Hossain, K., Buck, M., Bernnat, W., Lohnert, G., 2008b. “TH3D, A Three-Dimensional Thermal Hydraulic Tool, for Design and Safety Analysis of HTRs”. In: 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Washington, DC, USA. IAEA. "Fuel Performance, and Fission Product Behavior in Gas Cooled Reactors". IAEA-TECDOC-978, September 28–October, 2008
8. Cleveland, J.C., Greene, S.R.,. "Application of THERMIX-KONVEK Code to Accident Analysis of Modular *Pebble* Bed High Temperature Reactors (HTRs)". ORNL/TM-9905, August 1986
9. E.Teuchert, U.Hansen, K.A.Haas : ”VSOP-Computer Code Sysytem for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation” Kernforschungsanlage Julich, JUL-1649. 1980
10. Buthels,H,Buscher,R.Peterson. K, et.al.,;”Experimental Investigation of Thermo-hydraulics in HTR-Spherical Granular Assembly in Comparison With The Code THERMIX”, Annual Meeting of Nuclear Technology 83, Tahun 1983.
11. Strydom, C., “Tinte Uncertainty Analysis of The Maximum Fuel Temperature During a DLOFC Event for The 400 MW *Pebble* Bed Modular Reactor”, In: Proceedings of ICAPP04l Juni 2004.

DISKUSI / TANYA JAWAB :

PERTANYAAN: (Sumijanto – PTRKN BATAN)

1. Berapa temperature terbesar pada posisi radial teras paling pinggir?
2. Bagaimana dengan kemungkinan temperature yang terjadi pada bejana tekan reactor?

JAWABAN: (Sudarmono – PTRKN BATAN)

1. Temperature didaerah pendingin belum keluar yaitu sebesar 991 °C di pusat bahan bakar pebble. Temperature di daerah pendingin antara keluar dan masuk teras 777 °C di pusat bahan bakar pebble.
2. Kemungkinan temperature yang terjadi pada bejana tekan reactor adalah menurun di bawah temperature di atas, hal tersebut ditunjukkan oleh profil distribusi temperature ke arah radial mempunyai tren yang menurun menjauhi pusat teras.

PERTANYAAN: (Sriyono – PTRKN BATAN)

- Mengapa batas temperature maksimum yang diasumsikan adalah 1600 °C, padahal kita tahu saat ini ketahanan material bahan bakar sudah sampai pada 1800 °C?

JAWABAN: (Sudarmono – PTRKN BATAN)

- Penelitian yang dilakukan dengan pemanasan 1578 °C dan 1458 °C pada grafik bahan bakar bola menunjukkan adanya kerusakan bahan sehingga dilakukan sebagai pembatas maksimum. Temperature 1600 °C agar tidak melepaskan radio nuklida CS-137 yang dapat membahayakan tubuh manusia.