

ANALISIS TERMAL-ALIRAN KISI BAHAN BAKAR BOLA TERAS RGTT200K DENGAN FLUENT

Mohammad Dhandhang Purwadi
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN
Email: dhan@batan.go.id, m.dhandhang.purwadi@gmail.com

Diterima editor 10 Juli 2012

Disetujui untuk publikasi 27 September 2012

ABSTRAK

ANALISIS TERMAL-ALIRAN KISI BAHAN BAKAR BOLA TERAS RGTT200K DENGAN FLUENT. Sejalan dengan Perpres No.5/2010, PTRKN-BATAN mengembangkan dua varian desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi, yaitu RGTT200K dan RGTT200KT. Energi termal pada kedua sistem reaktor ini dipasok oleh teras reaktor berbahan bakar bola dengan daya termal 200 MWt. Komposisi geometri dan struktur teras didesain agar dapat menghasilkan keluaran pendingin gas helium bertemperatur 950°C sehingga dapat digunakan untuk produksi hidrogen dan atau unit industri proses lainnya secara kogeneratif. Luaran gas helium bertemperatur sangat tinggi ini akan menimbulkan tegangan termal pada bola bahan bakar yang mengancam integritas sistem pengungkungan produk fisi di dalamnya. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis termal-aliran untuk mengetahui distribusi temperatur dan aliran pendingin gas helium dalam kisi bahan bakar bola. Salah satu cara terbaik untuk melakukan analisis termal-aliran adalah dengan pemodelan tiga dimensi menggunakan perangkat lunak komputasi dinamika fluida (*computational fluid dynamics*) yang teruji. Dalam penelitian ini digunakan perangkat lunak FLUENT 6.3. Analisis termal-aliran pada kisi bola bahan bakar dilakukan dengan memodelkan dinamika fluida pendingin dengan perpindahan panas kombinasi tiga moda, konduksi, konveksi dan radiasi, serta mempertimbangkan adanya turbulensi aliran gas. Model *Discret Ordinate* dan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) masing-masing digunakan dalam perhitungan perpindahan panas radiasi dan turbulensi. Dari distribusi temperatur bola bahan bakar hasil pemodelan CFD dengan aliran turbulen pada pendinginnya diketahui bahwa temperatur maksimum bahan bakar bola mencapai $1036,1^{\circ}\text{C}$. Temperatur setinggi ini masih jauh dari temperatur yang dapat menyebabkan kegagalan pengungkungan produksi fisi, yaitu 1600°C .

Kata kunci: pemodelan pendinginan, model kisi kubus sederhana, reaktor kogenerasi, RGTT, komputasi dinamika fluida

ABSTRACT

THERMAL-FLOW ANALYSIS OF THE PEBBLE FUEL LATTICE IN THE RGTT200K CORE USING FLUENT. In accordance to the Presidential Regulation No.5/2010, PTRKN-BATAN develops two variants of conceptual design of the cogeneration advanced power reactor, i.e. RGTT200K and RGTT200KT. Thermal energy of both reactor systems are supplied by the pebble fueled reactor core with 200 MWt thermal powers. The geometry and structure of the core is designed to produce the output of helium gas coolant temperature as high as 950°C to be used for hydrogen production and/or other process industry in co-generative way. Output of very high temperature helium gas will cause thermal stress on the pebble fuel that threatens the integrity of fission products confinement on it. Therefore it is necessary to perform thermal-flow analysis to determine the temperature distribution and the helium coolant flow in the pebble fuel lattice. One of the best practices to performing thermal-flow analysis is carried out by three dimensional modeling with proven computational fluid dynamics (CFD) software. The FLUENT 6.3 CFD software was used in this study. Pebble lattice thermal-flow analysis was performed by modeling the fluid dynamics of the coolant with a combination of the three modes of heat transfer, conduction, convection and radiation, as well as considering the turbulence of the helium gas coolant stream. Discrete ordinate and Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) models are used in the calculation of the radiation heat transfer and turbulence respectively. From temperature distribution in the pebble fuel that resulting from CFD modeling with turbulen flow in the coolant it was known that the maximum pebble fuel temperature reaches $1036,1^{\circ}\text{C}$. This temperature is far from the temperature which can lead to failure of the fission product confinement, i.e. 1600°C .

Keywords: coolant modeling, simple cubic lattice model, co-generation reactors, HTGR, computational fluid dynamics

PENDAHULUAN

Ketahanan energi nasional harus diupayakan dengan serius untuk menopang keberlanjutan pembangunan nasional. Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2010 mengamanatkan untuk menyelesaikan desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi dalam rangka persiapan memberdayakan energi nuklir untuk berkontribusi dalam bauran energi nasional yang optimal (*optimum national energy mix*)[1]. Berdasarkan Perpres ini, PTRKN-BATAN mengembangkan dua varian desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi, yaitu RGTT200K dan RGTT200KT [2-4]. Energi termal pada kedua varian sistem reaktor ini dipasok oleh teras reaktor berbahan bakar bola (*pebble bed reactor*) dengan daya termal 200 MWt. Teras reaktor RGTT200K dan RGTT200KT mempunyai spesifikasi teknis yang sama [4], untuk itu dalam tulisan ini, pembahasan terkait teras reaktor cukup mengacu pada satu nama desain saja yaitu RGTT200K.

Komposisi geometri dan struktur teras reaktor RGTT200K didesain sedemikian rupa agar dapat menghasilkan temperatur keluaran pendingin gas helium setinggi 950°C , agar dapat digunakan untuk memasok energi termal kepada unit produksi hidrogen atau unit industri proses lainnya secara kogeneratif. Luaran pendingin gas helium dengan temperatur sangat tinggi ini akan menimbulkan tegangan termal yang cukup signifikan pada bola bahan bakar (*pebble fuel*) dan dapat mengancam integritas sistem pengungkungan produk fisi di dalamnya. Oleh karena itu perlu dilakukan suatu analisis termal dan aliran (*thermal-flow analysis*) untuk mengetahui distribusi temperatur dalam bola bahan bakar dengan mempertimbangkan adanya aliran pendingin gas helium di sekitar bola bahan bakar. Kondisi dalam teras reaktor berbahan bakar bola tidak memungkinkan untuk menempatkan alat pengukur temperatur dan tekanan pada bola bahan bakar, karena bola bahan bakar secara kontinu terus bergerak dari atas ke bawah, seiring dengan pola manajemen bahan bakar reaktor. Dengan demikian tidak mungkin mendapatkan data distribusi temperatur bahan bakar dan aliran pendingin dengan akurat menggunakan metode pengukuran langsung secara eksperimental dalam teras reaktor nuklir ini.

Salah satu cara terbaik dan murah untuk mendapatkan data perkiraan distribusi temperatur dalam bahan bakar bola yang akurat adalah dengan melakukan analisis termal-aliran melalui pemodelan menggunakan perangkat lunak komputasi dinamika fluida (*computational fluid dynamics*) tiga dimensi yang teruji[5,6]. Dengan cara ini, tujuan utama untuk mendapatkan distribusi termal dan aliran dalam bahan bakar dan pendingin dapat diperoleh, dan selanjutnya analisis integritas bahan bakar bola dapat dilakukan dengan seksama. Dalam penelitian ini digunakan perangkat lunak FLUENT 6.3[7]. Perangkat lunak CFD komersial ini telah terbukti akurat untuk memodelkan aliran fluida dalam reaktor gas temperatur tinggi dengan pendingin gas dan aliran fluida dalam medium poros berupa tumpukan bola (*packed sphere porous medium*)[8-15] seperti kondisi dalam *pebble bed reactor*.

Desain konseptual RGTT200K dimulai di PTRKN-BATAN sejak tahun 2010, desain neutronik teras dan sistem RGTT200K telah dilakukan tetapi analisis termal-aliran belum pernah dilakukan. Dalam penelitian ini dilakukan analisis termal-aliran pada kisi bola bahan bakar dengan bentuk kisi *simple cubic* (SC). Analisis dilakukan dengan pemodelan dinamika fluida pendingin dan perpindahan panas kombinasi tiga moda, konduksi, konveksi dan radiasi baik pada fluida maupun bahan bakar bola, serta mempertimbangkan adanya turbulensi dalam aliran gas helium. Perpindahan panas radiasi antar bola bahan bakar dimodelkan dengan model *Discret Ordinate*. Untuk memodelkan turbulensi aliran pendingin gas helium di sela-sela bola bahan bakar digunakan model *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS). Pemodelan dinamika fluida aliran satu fasa pada kisi bahan bakar SC dilakukan dengan berdasarkan rekomendasi dalam acuan [5]. Pemodelan dengan CFD akan banyak mengungkap tentang fenomena lokal yang datanya sangat diperlukan dalam analisis desain keselamatan, untuk memastikan bahwa desain teras RGTT200K tetap aman apabila dioperasikan secara normal dengan memberi keluaran pendingin gas helium bertemperatur 950°C .

DASAR TEORI

Analisis termal-aliran proses pendinginan kisi bahan bakar teras reaktor RGTT200K adalah simulasi fenomena fisis tentang proses pendinginan pada bahan bakar bola melalui pemodelan dengan

menggunakan perangkat lunak CFD dalam sebuah komputer. Dalam perangkat lunak CFD, fenomena fisis yang akan disimulasikan diwakili dengan model atau persamaan matematis. Persamaan matematis yang digunakan dalam pemodelan ini adalah persamaan kontinuitas (persamaan konservasi masa), persamaan konservasi momentum, persamaan konservasi energi dan persamaan model turbulensi untuk aliran viskos. Pendingin gas helium diasumsikan sebagai gas dapat mampat (*compressible gas*) dan hukum gas ideal digunakan untuk mendapatkan formulasi hubungan antara densitas dan temperatur, serta profil temperatur digunakan sebagai dasar untuk memperoleh sifat gas gas lainnya.

Pada kondisi tidak adanya penguapan maupun pengembunan (pengurangan atau penambahan masa dalam suatu fasa), persamaan kontinuitas yang digunakan dalam perangkat lunak CFD FLUENT 6.3 dapat dituliskan sebagai berikut [7].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Pada persamaan di atas, ρ dan \vec{v} adalah densitas fluida dan vektor kecepatan aliran fluida. Sedangkan t adalah menunjukkan simbol untuk waktu. Persamaan konservasi momentum untuk kerangka acuan inersial (tak mengalami percepatan) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini [7].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

p , $\bar{\bar{\tau}}$, \vec{g} , dan \vec{F} pada persamaan di atas adalah simbol untuk tekanan, tensor tekanan (*stress tensor*), vektor percepatan gravitasi, dan vektor-vektor gaya dari luar. Tensor tekanan didefinisikan sebagai [7]:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I} \quad (3)$$

μ dan \vec{I} pada persamaan ini adalah viskositas molekular dan satuan tensor. Suku kedua di ruas kanan menunjukkan efek dilatasi volume.

Perpindahan panas yang dimodelkan dalam penelitian ini adalah konduksi, konveksi dan radiasi. Penyelesaian persamaan konservasi energi dengan mempertimbangkan adanya perpindahan panas akan mensimulasikan proses perubahan energi yang terjadi dalam suatu kisi satuan bahan bakar bola pada teras RGTT200K. Persamaan konservasi energi yang digunakan dalam perangkat lunak FLUENT 6.3 adalah sebagai berikut [7].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E) + p) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (4)$$

k_{eff} adalah konduktivitas efektif dengan mempertimbangkan turbulensi yang terjadi dalam aliran fluida gas pendingin reaktor (gas helium). \vec{J}_j Adalah fluks difusi dari spesies yang ke- j . Suku energi E didefinisikan sebagai: $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ dengan h adalah entalpi.

Untuk memperhitungkan keberadaan perpindahan panas radiasi, digunakan model matematis diskrit ordinat seperti tertulis dalam persamaan di bawah ini [7].

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (5)$$

dengan \vec{r} : vektor posisi, \vec{s} : vektor arah, \vec{s}' : vektor arah pembiasan sinar, s : panjang lintasan, a : koefisien serapan, n : indeks refraktis, σ_s : koefisien pembiasan, σ : konstanta Stefan-Boltzman, I : intensitas radiasi tergantung pada posisi dan arah, Φ : fungsi fase dan Ω' adalah sudut ruang. Suku $(a + \sigma_s)$ menunjukkan faktor opasitas (*opacity*) medium atau sering disebut dengan ketebalan optis. Untuk medium semi transparan, indeks refraktif mempunyai kontribusi penting dalam perhitungan perpindahan panas radiasi.

Pemodelan aliran turbulensi adalah suatu fenomena yang kompleks, sampai saat ini belum ada satu model yang secara umum dapat digunakan untuk semua kondisi [7], oleh karena itu FLUENT 6.3 menyediakan beberapa model yang dapat dipilih sesuai dengan kondisi. Secara umum terdapat tiga tipe model yaitu model berbasis pada Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), Detached Eddy Simulation (DES) dan Large Eddy Simulation (LES) [16]. Dalam penelitian ini digunakan model Spalart-Allmaras yang berbasis pada model RANS. Model Spalart-Allmaras cukup sederhana karena hanya membutuhkan satu persamaan, hasil perhitungan tidak detail, tetapi rentang spektrum aplikasinya

cukup luas. Model Spalart-Allmaras menyelesaikan viskositas kinematik turbulensi $\tilde{\nu}$, berikut ini adalah persamaan transport $\tilde{\nu}$ dalam model Spalart-Allmaras [7].

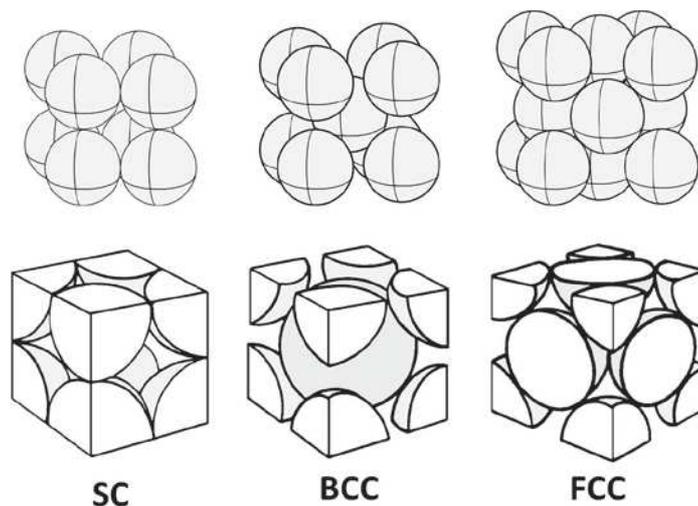
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_{\nu} + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_{\nu} \quad (6)$$

pada persamaan ini, G_{ν} dan Y_{ν} masing-masing adalah pembangun dan penghancur viskositas turbulen yang terjadi di dekat daerah dinding fluida karena penahanan dan penghentian viskositas. ν adalah viskositas kinematik, $\sigma_{\tilde{\nu}}$ dan C_{b2} adalah konstanta yang harus diberikan dalam perhitungan aliran turbulen.

METODOLOGI

Desain konseptual sistem RGTT200K maupun RGTT200KT telah menetapkan bahwa teras reaktor berbahan bakar bola dengan pendingin gas helium, harus mampu menghasilkan keluaran gas helium bertemperatur 950°C pada kondisi operasi normal [4]. Untuk menjamin keselamatan operasi reaktor, maka perlu dilakukan analisis termal dan aliran fluida di sekitar bahan bakar bola sehingga diperoleh distribusi temperatur dalam bola bahan bakar maupun dalam medium fluida pendingin (gas helium), dengan mempertimbangkan adanya aliran turbulen serta perpindahan panas radiasi. Pertimbangan aliran turbulen harus masuk karena pendingin yang digunakan adalah fluida dapat mampat (*compressible fluid*) berbentuk gas dengan laju alir masa cukup tinggi (114 kg/detik) [4]. Alasan untuk memasukkan pertimbangan adanya perpindahan panas secara radiasi adalah karena temperatur permukaan bola diperkirakan akan jauh lebih tinggi dari 300°C, suatu temperatur yang akan menyebabkan kontribusi perpindahan panas radiasi menjadi tak terabaikan. Walaupun demikian, dalam penelitian ini juga diselidiki kasus perpindahan panas yang tak melibatkan perpindahan panas radiasi, karena hal itu akan meningkatkan temperatur dalam bahan bakar bola, dan berarti akan diperoleh data yang lebih konservatif, dan sangat berguna dalam proses desain keselamatan.

Analisis termal-aliran yang melibatkan seluruh dimensi teras akan membutuhkan waktu komputasi lama dengan jaminan konvergensi yang rendah serta hasilnya kurang detail. Oleh karena itu dalam analisis termal-aliran ini, analisis dilakukan terhadap kisi bola bahan bakar reaktor gas temperature tinggi (RGTT200K). Dalam analisis neutronik maupun termal-aliran pada teras bahan bakar bola, terdapat tiga bentuk struktur kisi yang sering digunakan, yaitu *Simple Cubic* (SC), *Body Centered Cubic* (BCC) dan *Face Centered Cubic* (FCC) ketiga bentuk kisi tersebut diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bentuk struktur kisi bahan bakar bola

Tidak semua bentuk struktur kisi pada Gambar 1 akan dianalisis dalam analisis termal-aliran teras RGTT200K. Harus dilakukan seleksi diantara ketiga bentuk struktur kisi, bentuk mana yang akan menghasilkan kondisi yang paling konservatif, dan dengan demikian data yang akan diperoleh adalah data dengan kondisi yang pesimistik.

Analisis termal-aliran fasilitas uji NACOK dengan perangkat lunak FLUENT dalam acuan [8] menggunakan harga porositas sebesar 0,395 (faktor $packing = 1 - 0,395 = 0,605$). Porositas maksimum pada struktur kisi SC adalah 0,476 dan pada struktur kisi BCC 0,320. Dari acuan ini jelas bahwa bola-bola bahan bakar dalam teras secara rata-rata sebagian besar akan menempatkan diri sedemikian rupa sehingga membentuk struktur SC dan BCC, karena nilai porositas 0,395 berada antara 0,320 (porositas BCC) dan 0,476 (porositas SC), sedangkan FCC akan menghasilkan porositas maksimum yang lebih kecil dari nilai porositas BCC (0,320), dengan demikian kisi FCC tak perlu dipertimbangkan lagi dalam studi ini. Data parameter lain dari struktur kisi SC dan BCC ditunjukkan pada Table 1. Dasar perhitungan pada parameter kisi terkait daya pembangkitan panas adalah, terjadi pembangkitan daya panas rata-rata sebesar 3 MW/m^3 pada teras reaktor [15], dan teras reaktor dialiri pendingin gas helium dengan laju aliran massa 114 kg/detik [4].

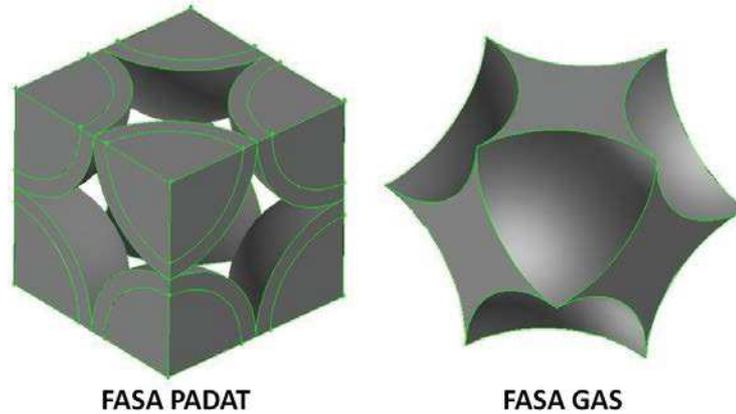
Dari data dalam Tabel 1, terlihat bahwa kisi SC mempunyai kondisi yang lebih panas dibandingkan dengan kisi BCC. Data menunjukkan bahwa kisi SC mempunyai densitas daya lebih tinggi tetapi dialiri pendingin dengan debit aliran yang lebih rendah. Fakta ini menunjukkan bahwa pembangkitan panas lebih besar, sementara itu pengambilan panas oleh pendingin lebih kecil. Dengan fakta yang ditunjukkan dalam Tabel 1, maka cukup alasan bila dalam penelitian ini bahwa analisis termal-aliran cukup dilakukan pada kisi SC.

Tabel 1. Parameter penting pada bentuk struktur kisi bahan bakar bola SC dan BCC

No	Parameter kisi	Satuan	Kisi SC	Kisi BCC
1.	Panjang sisi kubus kisi	m	0,06	0,069282
2.	Luas muka sisi kubus	m^2	0,0036	0,004799996
3.	Luas muka kanal fluida	m^2	0,000772567	0,001972562
4.	Debit fluida pendingin	m^3/s	0,016233744	0,041448942
5.	Laju alir massa	kg/s	0,008248854	0,021061454
6.	Volume total kisi	m^3/s	0,000216	0,000332553
7.	Volume padatan dalam kisi	m^3	0,000113097	0,000226195
8.	Volume fluida dalam kisi	m^3	0,000102903	0,000106359
9.	Porositas kisi	-	0,476401224	0,319824287
10.	Densitas daya dalam kisi	MW/m^3	5,729577951	4,410624994

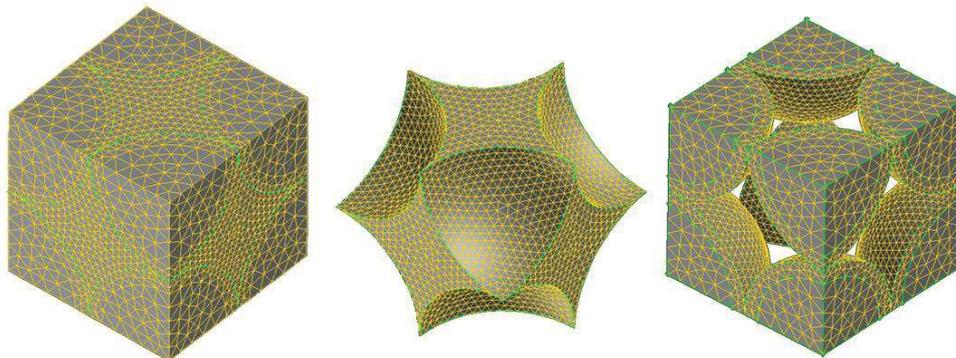
Parameter kisi dalam Tabel 1 digunakan dalam pemodelan kisi bahan bakar bola dengan struktur kisi SC. Data lain terkait material grafit dan gas helium telah tersedia dalam FLUENT 6.3. Bola bahan bakar mempunyai diameter 6,0 cm, 5,0 cm terdiri dari material grafit dicampur dengan partikel bahan bakar TRISO dengan di dalamnya terjadi pembangkitan energi panas sebesar $5,7296 \text{ MW/m}^3$, selanjutnya lapisan luar setebal 0,5 cm terbuat dari grafit tetapi di dalamnya tidak terjadi pembangkitan energi panas. Partikel bahan bakar TRISO (TRistructural-ISOtropic material) berdiameter 0,92 mm. Partikel ini terbuat dari bahan bakar uranium/thorium oksida berdiameter 0,5 mm dilapisi dengan 4 lapisan grafit-PyroCarbon-SiC-PyroCarbon hingga diameternya menjadi 0,92 mm.

Model kisi SC hasil pengembangan/pembuatan dengan perangkat lunak GAMBIT (perangkat lunak standar dari FLUENT untuk membangun geometri model dan melakukan diskritisasi [17]) ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan kisi SC bola bahan bakar RGTT200K

Mengacu pada Gambar 2, dalam pemodelan ini, aliran gas masuk dari permukaan kubus sisi atas kisi SC dan keluar dari bagian bawah. Sisi samping kisi SC dimodelkan sebagai dinding simetri. Setelah model kisi SC terbentuk, langkah selanjutnya adalah diskritisasi model kisi. Untuk memudahkan proses diskritisasi volume hingga (*finite volume*) digunakan elemen volume tetrahedral (empat muka) dengan bentuk sisi segitiga. Gambar 3 menunjukkan gambar model kisi SC setelah didiskritisasi dengan elemen volume tetrahedral. Terlihat pada gambar tersebut bahwa diskritisasi dilakukan dengan ukuran elemen tetrahedral yang berbeda. Strategi diskritisasi dilakukan dengan menggunakan elemen volume berukuran kecil pada geometri yang berdimensi kecil, dan sebaliknya menggunakan elemen volume berukuran besar untuk geometri yang besar. Dengan demikian ketelitian dan detail hasil perhitungan terjaga. Mengingat kompleksnya fenomena perpindahan panas dan aliran turbulensi, diskritisasi dalam medium pendingin helium berfasa gas dilakukan dengan elemen volume yang lebih kecil agar ketelitian perhitungan dapat terjaga dengan baik. Untuk menjaga ketelitian perhitungan, grafit bola bahan bakar dengan pembangkitan panas didiskritisasi dengan ukuran mesh 0,0050 m, dan lapisan grafit serta fluida pendingin di mana di dalamnya tak terjadi pembangkitan panas didiskritisasi dengan mesh berukuran 0,0025 m.

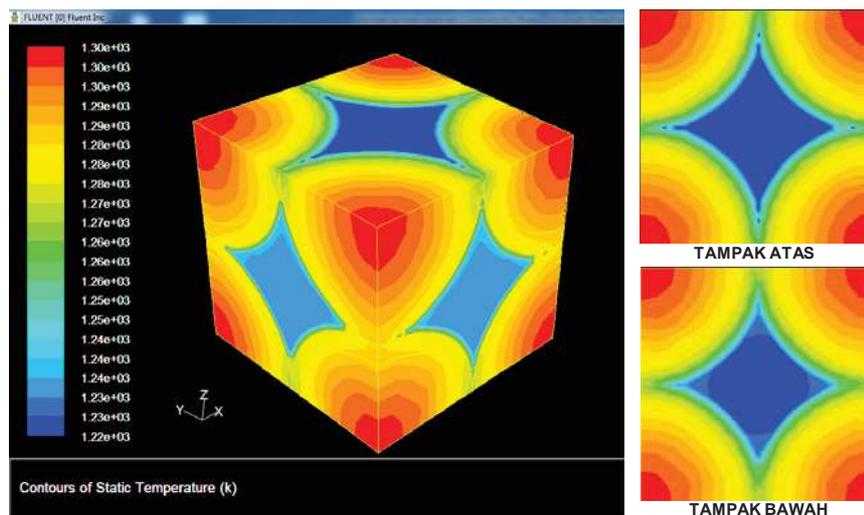


Gambar 3. Diskritisasi model kisi SC dalam teras RGTT200K

Perpindahan panas radiasi akan berlangsung dalam kuantitas yang cukup berarti, terutama pada temperatur tinggi. Perpindahan panas ini akan memindahkan energi panas dari bola bahan bakar ke material di sekitarnya, dan menyebabkan temperatur bola menjadi lebih rendah apabila dibandingkan dengan kondisi tanpa adanya kontribusi perpindahan panas radiasi. Untuk itu, dalam rangka mendapatkan distribusi temperatur dalam bola bahan bakar yang lebih konservatif, maka dalam penelitian ini diselidiki juga perilaku termal dan aliran dalam kisi bola bahan bakar tanpa mempertimbangkan adanya kontribusi perpindahan panas secara radiasi.

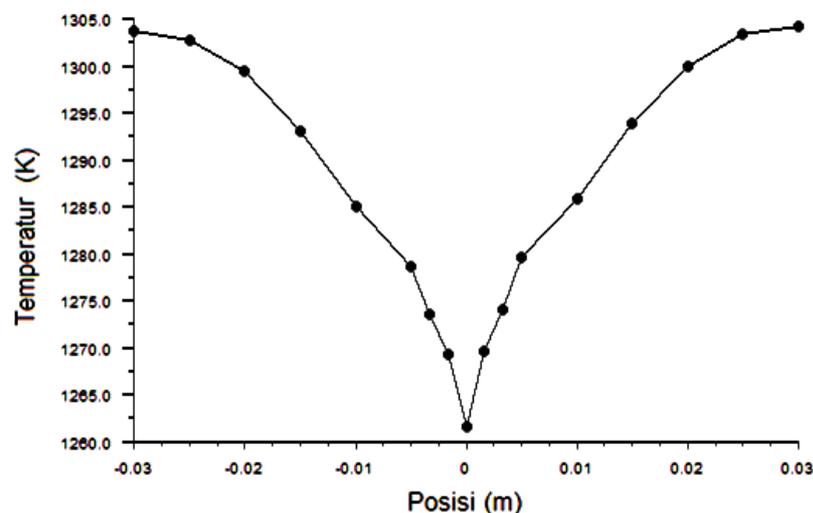
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perpindahan panas radiasi dan turbulensi adalah fenomena yang kompleks, oleh karena itu dalam perhitungan komputasi dinamika fluida akan memerlukan waktu perhitungan yang cukup lama dalam mencapai konvergensi. Untuk menghindari kegagalan pencapaian konvergensi perhitungan, digunakan strategi untuk lebih dahulu mengabaikan pemodelan perpindahan panas radiasi dan aliran turbulen. Setelah perhitungan tanpa model perpindahan panas radiasi dan aliran turbulen mencapai konvergen, dan profil distribusi temperature dan aliran 3 dimensi dalam kisi bahan bakar SC diperoleh, maka profil tersebut digunakan sebagai profil inisial untuk perhitungan dinamika fluida dengan mempertimbangkan turbulensi dan perpindahan panas radiasi. Hasil dari perhitungan tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.

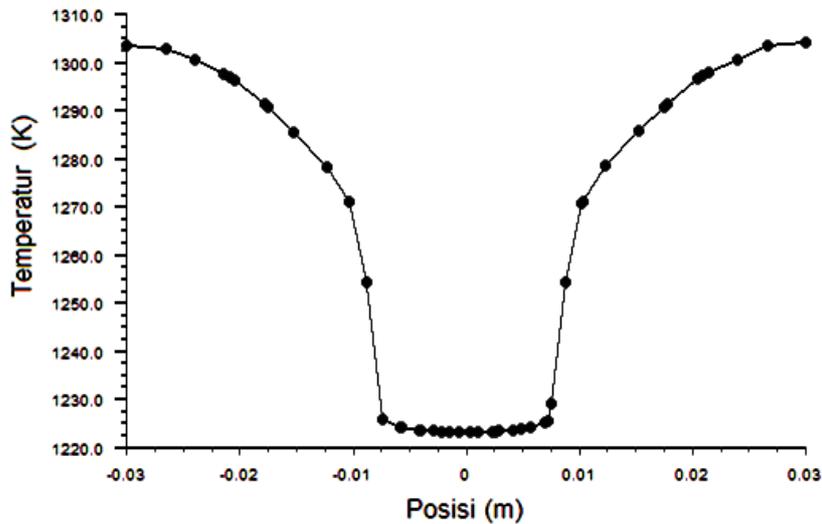


Gambar 4. Profil temperatur dalam kisi bahan bakar bola teras RGTT200K

Gambar 4 memperlihatkan profil tiga dimensi dari distribusi temperatur dalam kisi bola bahan bakar. Pada gambar ini terlihat adanya degradasi/penurunan temperatur secara bertahap dari pusat bola bahan bakar ke arah luar. Dalam medium pendingin gas helium juga terlihat adanya distribusi penurunan temperatur, dari temperatur tinggi di dekat permukaan bola, hingga temperatur rendah di tengah bagian tengah medium pendingin. Bentuk profil dua dimensi dari distribusi temperatur antara dua bola bahan bakar yang berdekatan (bersentuhan) dan berjauhan (dibatasi medium pendingin) diperlihatkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Profil 2-D distribusi temperatur antara dua bola bahan bakar berdekatan

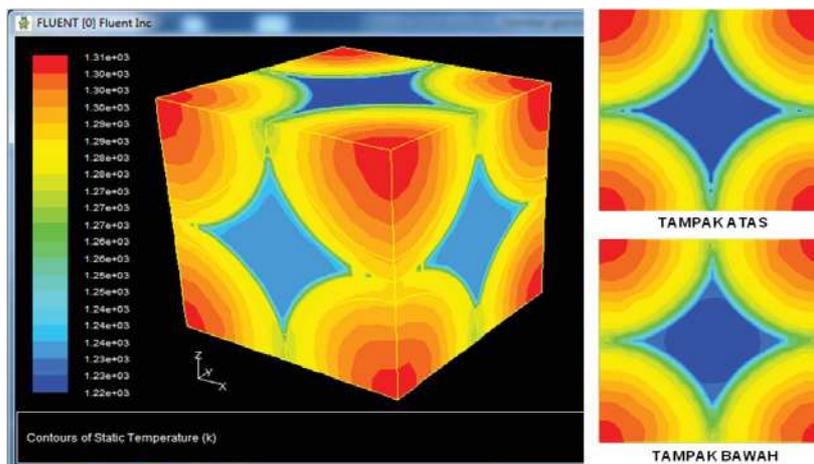


Gambar 6. Profil 2-D distribusi temperatur antara dua bola bahan bakar berjauhan

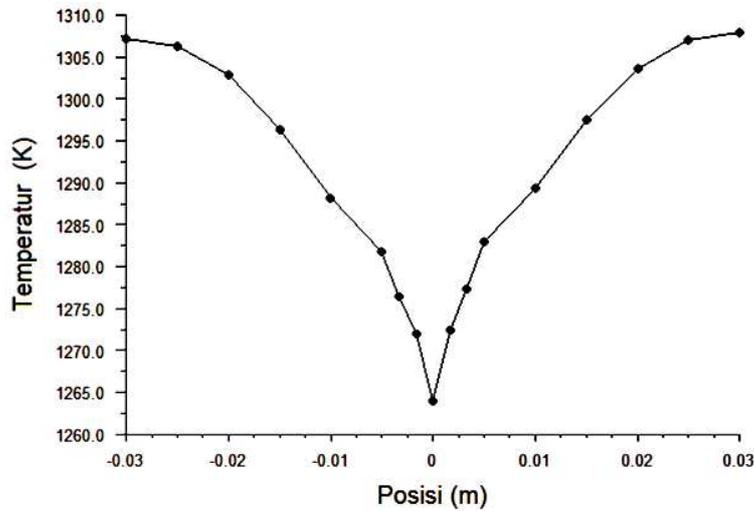
Sumbu-x pada Gambar 5 dan 6 tidak menunjukkan jarak pada sumbu-x, tetapi menunjukkan posisi dalam koordinat sumbu-x pada kisi. Posisi sumbu-x, sumbu-y dan sumbu-z, masing-masing bergerak dari -0,03 hingga +0,003, titik pusat kisi berada di tengah volume kisi dengan koordinat (0,0,0). Dengan suatu fungsi yang disediakan oleh FLUENT dapat diketahui temperatur minimum adalah 950°C (1223 K), yaitu pada pendingin gas helium masuk kisi (lihat profilnya pada Gambar 4 tampak atas), sedangkan temperatur maksimum adalah $1031,9^{\circ}\text{C}$ (1304,9 K) pada titik pusat salah satu bola bahan bakar. Temperatur maksimum ini masih jauh dari batas temperatur yang dapat merusak bahan bakar bola (terutama pada partikel TRISO), yaitu 1600°C , seperti yang dikemukakan dalam acuan [18].

Dari hasil komputasi dinamika fluida dengan FLUENT, terbukti temperatur maksimum masih berada 568,1 derajat di bawah batas temperatur yang diizinkan (1600°C). Untuk mendapatkan kondisi yang lebih konservatif, dalam penelitian ini dilakukan analisis termal-aliran dengan asumsi perpindahan panas radiasi tidak ikut berkontribusi dalam memindahkan energi panas dari bahan bakar ke pendingin gas helium. Hasil komputasi dinamika fluida dengan FLUENT tanpa memperhitungkan perpindahan panas radiasi diperlihatkan pada Gambar 7.

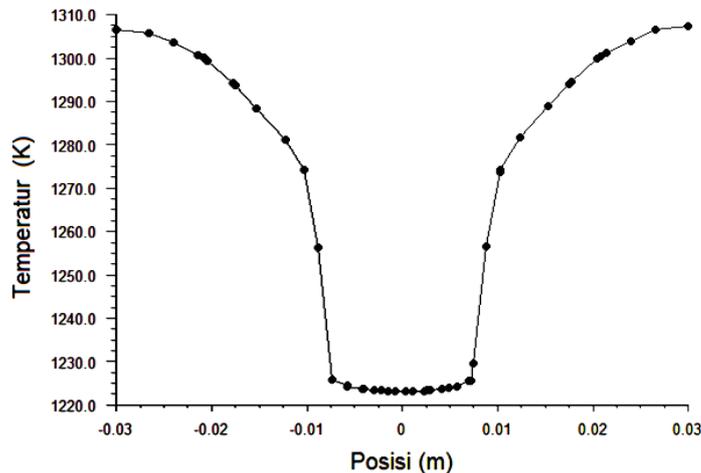
Profil 3D distribusi temperatur pada Gambar 7 menunjukkan pola simetris yang serupa dengan hasil komputasi pada Gambar 4, tetapi terlihat bahwa temperatur maksimumnya lebih tinggi. Untuk lebih detailnya dapat dilihat pada grafik Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 7. Profil 3D distribusi temperatur kisi SC RGTT200K tanpa perpindahan panas radiasi



Gambar 8. Profil 2-D distribusi temperatur antara dua bola bahan bakar berdekatan (tak ada radiasi)



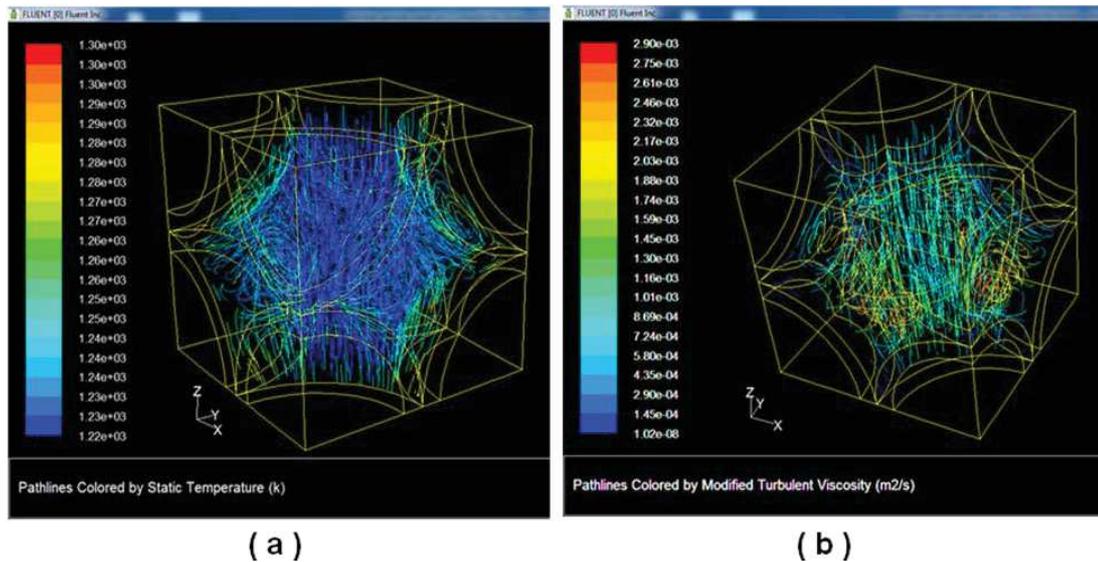
Gambar 9. Profil 2-D distribusi temperatur antara dua bola bahan bakar berjauhan (tak ada radiasi)

Dari kurva pada grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 8 dan 9, terlihat dengan jelas bahwa ketiadaan kontribusi dari perpindahan panas radiasi akan meningkatkan temperatur maksimum bahan bakar, dengan menggunakan fungsi dalam FLUENT, dapat diketahui bahwa temperatur maksimum di salah satu pusat bahan bakar mencapai $1036,1^{\circ}\text{C}$ (1309 K), sedangkan temperatur minimum terjadi pada titik tengah permukaan pendingin gas helium masuk kisi bahan bakar, yaitu 950°C (1223 K). Dari hasil analisis termal-aliran tanpa melibatkan perpindahan panas, terbukti dapat diperoleh temperatur maksimum bahan bakar yang lebih konservatif, yaitu naik sekitar 5 derajat, menjadi $1036,1^{\circ}\text{C}$. Tetapi temperatur ini masih 564 derajat di bawah batas temperatur yang diizinkan (1600°C).

Dengan demikian, desain konseptual sistem RGTT200K yang memperkerjakan teras reaktor untuk beroperasi pada temperatur setinggi 950°C tidak menyebabkan bahan bakar reaktor berada pada daerah rawan yang dapat mengancam integritas partikel TRISO dalam mengungkung radionuklida hasil reaksi fisi, atau dengan kata lain desain konseptual sistem RGTT200K masih layak dan masih dalam batas aman.

Selain profil 3D dari distribusi bahan bakar dalam struktur kisi bahan bakar SC, analisis termal-aliran ini juga menghasilkan profil aliran pendingin gas fluida dalam kisi. Profil aliran turbulen ini digunakan dalam FLUENT untuk menghitung perpindahan panas secara konveksi dari dinding bola

bahan bakar ke pendingin gas helium. Gambar 10 berikut ini menunjukkan profil 3D dari *streamline* aliran pendingin gas helium di ruang antara bola-bola bahan bakar.



Gambar 10. Profil 3D dari *streamline* aliran pendingin gas helium dalam kisi SC

Gambar 10(a) menunjukkan pola *streamline* aliran gas helium diwarnai dengan temperturnya, sedangkan Gambar 10(b) menunjukkan viskositas turbulen termodifikasi. Warna merah pada pada Gambar 10(b) menunjukkan besarnya intensitas turbulensi. Pada gambar terlihat bahwa aliran turbulensi terjadi dengan jelas pada ruang sempit diantara dua bola, dan FLUENT berhasil memodelkan aliran turbulen dengan cukup baik.

KESIMPULAN

Telah dilakukan analisis termal-aliran terhadap kisi bahan bakar bola teras RGTT200K dengan menggunakan perangkat lunak CFD FLUENT. Dari distribusi temperatur kisi bahan bakar yang diperoleh melalui pemodelan dinamika fluida dan transfer panas dalam kisi bola bahan bakar dengan struktur berbentuk SC, diketahui bahwa temperatur maksimum bahan bakar pada kondisi operasi normal yang konservatif hanya mencapai 1036,1°C (1309 K), dan temperatur minimum 950°C (1223 K). Temperatur maksimum dalam bahan bakar ini masih jauh dari batas temperatur yang akan membuat integritas pengungkungan produk fisi dalam partikel bahan bakar TRISO mengalami kegagalan. Oleh karena itu desain konseptual teras RGTT200K akan aman dioperasikan dengan temperatur pendingin setinggi 950°C.

Studi terhadap kontribusi perpindahan panas secara radiasi menunjukkan bahwa perpindahan panas radiasi mempunyai kontribusi yang tak dapat diabaikan karena dapat menurunkan temperatur maksimum bahan bakar hingga 4,2 derajat, yaitu dari 1036,1°C menjadi 1031,9°C. Selain studi kontribusi perpindahan panas radiasi, terbukti pula FLUENT 6.3 dapat dengan baik memodelkan aliran turbulensi di celah-celah sempit dalam ruang antara bahan bakar bola dalam struktur kisi SC.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim. Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2010-2014. Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2010.
2. Purwadi M.D. Desain konseptual sistem reaktor daya maju kogenerasi berbasis RGTT. Proseding Seminar TKPFN-16 Surabaya, ITS-Surabaya; 2010.

3. Purwadi M.D. Desain konseptual sistem RGTT 200 MWt siklus tak langsung. Proseding Seminar TKPFN-17 Yogyakarta, UNY-Yogyakarta; 2011.
4. Purwadi, M.D. Analisis dan optimasi desain sistem reaktor gas temperatur tinggi RGTT200K dan RGTT200KT, *J. Tek. Reaktor Nukl.* 2012; 14; 1-12.
5. Mahaffy J., Chung B., Dubois F. et al. Best practice guide lines for the use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications, NEA/CSNI/R(2007)5, Committee on The Safety of Nuclear Installations, Nuclear Energy Agency, France; 2007.
6. Li H., Qiu S., Zhang Y., et al. Thermal hydraulic investigations with different fuel diameters of pebble bed water cooled reactor in CFD simulation; *Annals of Nuclear Energy.* 2012; 42: 135–147.
7. Fluent Inc. FLUENT 6.3 User's Guide, Lebanon, New Hampshire (USA); 2006.
8. Brudieu M. V. Blind benchmark predictions of the NACOK air ingress tests using the CFD Code FLUENT, Master Thesis, Department of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute Of Technology, USA; 2007.
9. Taylor J.B., Yavuzkurt S., Baratta A.J. Modeling of the fluid flow and heat transfer in a pebble bed modular reactor core with a Computational Fluid Dynamics Code. Proceeding of 10th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 10) ASME Conference, Vol. 2, April 14–18, 2002, ISBN: 0-7918-3596-0, <http://dx.doi.org/10.1115/ICONE10-22286>. 2002
10. Johnson R.W., Schultz R.R. Standard problem for CFD validation – Status Report, INL/EXT-10-19119, Idaho National Laboratory, USA; 2010.
11. Johnson, R. W. Examination of a proposed data set using CFD calculations, paper FEDSM2009-78317. Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Summer Meeting (FEDSM2009), Vail, Colorado; 2009.
12. Johnson, R. W., Evaluation of an experimental data set to be validation data for CFD for a VHTR, Proceedings of the CFD4NRS-3 conference, Washington, D.C.; 2010.
13. Johnson, R. W., and H. M. McIlroy. CFD simulation of proposed validation data for a flow problem reconfigured to eliminate an undesirable flow instability, paper FEDSM-ICNMM2010-30522. Proceedings of the 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Montreal, Canada; 2010.
14. Johnson, R. W., and R. R. Schultz. Computational fluid dynamic analysis of the VHTR lower plenum standard problem, INL/EXT-09-16325, Idaho National Laboratory; 2009.
15. Johnson, R. W., H. M. McIlroy, R. C. Johnson, and D. P. Christensen, 2010, undesirable flow behavior in a proposed validation data set, Paper ICONE18-29474. Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE18), Xi'an, China; 2010.
16. Marshall, E. M., and Bakker A. Computational fluid mixing, fluent inc. Lebanon. New Hampshire (USA); 2003.
17. Fluent Inc., GAMBIT 2.3 User's Guide, Lebanon. New Hampshire (USA); 2006.
18. Zhou X.W. and Tang C.H. Current status and future development of coated fuel particles for high temperature gas-cooled reactors. *Progress in Nuclear Energy* . 2011; 53: 182-188.