

Analisis perpindahan panas *solid material* RGTT200K

Sudarmono

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir-BATAN
Gedung 80, Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang 15310
e-mail: smonomono2003@yahoo.com

Abstrak

Pada saat ini BATAN tengah menyusun konseptual desain reaktor gas temperatur tinggi untuk kogenerasi dengan daya 200 MWt yang dinamakan RGTT200K. Reaktor ini menggunakan *solid material* grafit sebagai moderator dan bahan bakar berpengayaan rendah *LEU-TRISO (Low Enriched Uranium–Triple Coated Isotropic)*, bahan bakar ini menggunakan lapisan grafit di bagian terluar. Grafit memiliki kelakuan yang rumit terkait dengan temperatur tinggi, termasuk perubahan pada sifat termal seperti konduktivitas termal. Oleh karena itu optimasi analisis perpindahan panas *solid material* di dalam dan di luar teras harus sudah dikerjakan sejak tahap awal desain. Makalah ini bertujuan menyampaikan hasil analisis mengenai perpindahan panas *solid material* RGTT200K, di dalam dan di luar teras reaktor. Analisis dilakukan melalui perhitungan temperatur *solid material* dan penurunan tekanan gas helium pada RGTT200K menggunakan program *THERMIX* yang merupakan salah satu program perhitungan panas di dalam program *Very Superior Old Program (VSOP)*. Hasil analisis menunjukkan bahwa perpindahan panas *solid material* sebagai penyusun bejana reaktor yang diidentifikasi melalui letak atau posisi arah radial di luar teras berhasil disimulasikan, demikian pula dengan *solid material* di dalam teras yang merupakan moderator dan bahan bakar. Temperatur *solid material* tertinggi berada di zona tengah teras sebesar 658°C, sehingga integritas sistem pengungkungan produk fisi masih terjaga.

Kata kunci: *solid material*, RGTT200K, program *THERMIX*.

Abstract

Recently BATAN has been preparing a high temperature gas reactor conceptual design for cogeneration by power of 200 MWt, namely RGTT200K. The reactor uses graphite solid material as moderator and LEU-TRISO (Low Enriched Uranium–Triple Coated Isotropic) as fuel element, which graphite is used as outer layer. Regarding to high temperature operation, graphite has complicated characteristics, including thermal conductivity. Therefore the solid material analysis in core and out of the reactor core should be analyzed in the beginning of design. This paper presents the analysis of heat transfer of RGTT200K solid material using THERMIX program by calculating the solid material temperatures and pressure drop of helium gas, as one of calculation program in Very Superior Old Program (VSOP). The results show that heat transfer of solid material as a reactor vessel component can be simulated its position successfully, hence the same with solid material in core as a moderator and fuel element. The highest temperature in the center position is 658°C, therefore the integrity of fission product containment is still tenable.

Keywords: solid material, RGTT200K, THERMIX program.

1. Pendahuluan

RGTT200K adalah reaktor gas temperatur tinggi kogenerasi yang didesain oleh BATAN guna pemanfaatan energi nuklir. Reaktor ini diklaim memiliki efisiensi yang tinggi karena sifat pemanfaatan panasnya yang bertingkat [1]. RGTT200K menggunakan *solid material*

(bahan struktur padatan) yang terdiri dari grafit (moderator) dan bahan bakar tipe *TRISO* yang berlapis grafit [2]. Grafit memiliki kelakuan yang rumit terkait dengan temperatur tinggi, termasuk perubahan pada sifat termal seperti nilai konduktivitas termalnya. Reaktor yang beroperasi pada tingkat daya yang tinggi mengakibatkan pembangkitan fluks panas yang

tinggi pula, sehingga terjadi perubahan kesetimbangan panas karena temperatur di dalam reaktor naik, yang dapat mengakibatkan kerusakan pada *solid material* teras, yang secara dominan disusun oleh grafit. Oleh karena itu optimasi analisis perpindahan panas *solid material* di dalam dan di luar teras reaktor harus sudah dikerjakan sejak tahap awal desain, sehingga dapat digunakan untuk sarana pengembangan desain lebih lanjut serta agar tidak terjadi hal yang tidak diinginkan seperti terjadinya kecelakaan nuklir.

Kecelakaan reaktor Fukushima menjadikan reaktor gas temperatur tinggi seperti RGTT200K menarik untuk dipilih sebagai pembangkit energi, karena dipandang memiliki keselamatan melekat akibat fitur material yang digunakan, pengungkungan bahan bakar dalam lapisan ganda, *inertia* panas moderator grafit, efisiensi termal tinggi, serta siklus bahan bakar yang fleksibel dengan kemampuan untuk mencapai tingkat derajat bakar (*burn-up*) tinggi.

Berdasarkan pengalaman pada eksperimen temperatur *solid material* yang dilakukan di Jerman, menunjukkan bahwa *solid material* mengalami kegagalan uji pemanasan pada temperatur 1600°C[3]. Pengalaman penelitian sebelumnya pada modul *HTR* (high temperature reactors) Jerman dan *PBMR* (*Pebble bed modular reactors*) Afrika Selatan, menunjukkan bahwa kegagalan *solid material* terjadi pada temperatur maksimum sebesar 1472°C dan 1485°C[4]. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan optimasi desain konseptual teras reaktor daya maju berbasis RGTT200K. Analisis dilakukan dengan cara memvalidasi program *VSOP* dengan membandingkan hasil perhitungan *thermal-flow* antara *originalVSOP-94* dan *modifiedVSOPRGTT200K*. Hasil validasi menunjukkan terdapat perbedaan hasil perhitungan <0,6%[5]. Demikian pula dengan analisis kemampuan pendingin dalam mengambil panas yang dibangkitkan teras RGTT200K. Analisis dilakukan dengan cara membandingkan hasil yang diperoleh antara program *ATTICA 3D* dan program *THERMIX*. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat perbedaan hasil perhitungan, dengan *error* relatif <1,5%[6].

Bahan bakar RGTT200K berbentuk bola-bola yang tersusun dalam suatu unit reaktor

berbentuk *pebble bed*. Perpindahan panas yang dihasilkan oleh bola-bola *pebble* di dalam bejana reaktor berlangsung dalam suatu geometri tiga dimensi yang kompleks dan tersusun dari beragam material, yang didinginkan oleh gas helium sebagai pendingin. Mekanisme perpindahan panas berlangsung secara konduksi, konveksi dan radiasi. Oleh karena itu model perpindahan panasnya cukup kompleks, sehingga diperlukan penggunaan perangkat simulasi perhitungan yang sesuai.

Untuk mencapai temperatur gas yang tinggi, gas helium yang berfungsi mengambil panas yang dihasilkan bahan bakar, diinjeksikan ke dalam teras reaktor dengan temperatur yang telah mengalami pemanasan awal. *Output* pendingin gas helium dengan temperatur tinggi ini akan menimbulkan tegangan termal yang signifikan pada seluruh material yang berada di dalam maupun di luar teras, sehingga berpotensi mengancam integritas sistem pengungkungan produk fisi di dalamnya. Oleh karena itu kemampuan pengambilan panas yang dihasilkan dari teras merupakan suatu titik kunci dari salah satu kriteria reaktor generasi IV[7]. Untuk memenuhi kriteria tersebut perlu dilakukan suatu analisis distribusi temperatur *solid material* di dalam teras reaktor. Sesuai kriteria pembatas yang diberlakukan agar integrasi sistem pengungkungan produk fisi tetap terjaga dan tidak melepaskan radioisotop nuklida Cs-137 yang membahayakan bagi tubuh manusia, maka sistem pengungkungan produk fisi harus <1600°C[3].

Analisis perpindahan panas *solid material* di dalam dan di luar teras RGTT200K dilakukan menggunakan paket program komputer *THERMIX*[8]. Perhitungan dilakukan berdasarkan pada puncak daya dengan densitas daya maksimum 3 MWt/m³ dan pemodelan desain konseptual yang telah dibuat pada reaktor *HTR-PM*[4].

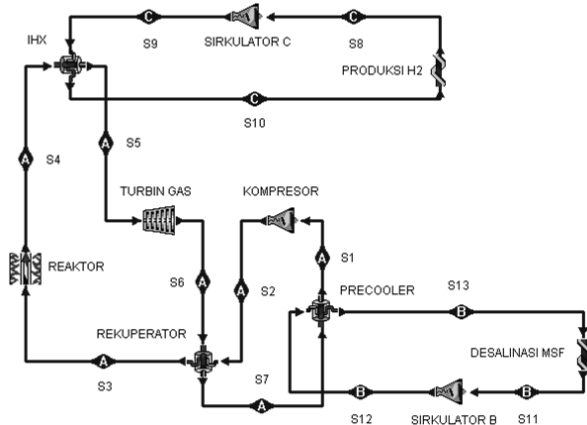
2. Teori

2.1. Deskripsi Desain RGTT200K

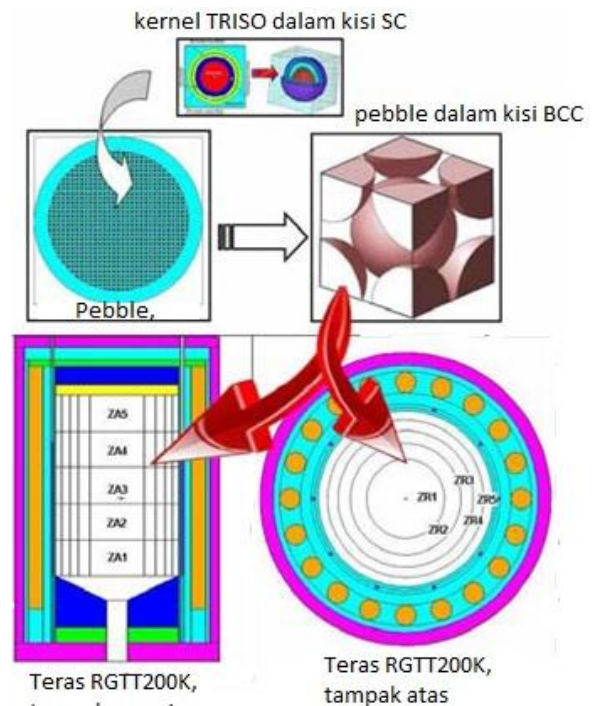
Reaktor berpendingin gas temperatur tinggi RGTT200K adalah reaktor yang sedang dikembangkan BATAN dalam bentuk konseptual desain dengan daya 200MWt. Reaktor ini akan dimanfaatkan untuk

pembangkitan listrik dan pemanfaatan panas untuk industri. RGTT200K merupakan reaktor dengan moderator grafit, berpendingin helium. Untuk mengubah panas yang dibangkitkan oleh fisi nuklir menjadi energi listrik, digunakan siklus gas langsung atau tak langsung dengan model siklus Brayton helium.

Pendingin helium akan memindahkan panas yang dibangkitkan oleh reaksi fisi di dalam teras reaktor dari sistem primer ke pembangkit uap, untuk selanjutnya akan dimanfaatkan panasnya secara bertingkat sesuai derajat temperatur yang diperlukan, proses ini disebut kogenerasi. Dalam pembangkit uap panas akan diserap oleh sistem uap air umpan di dalam sistem sekunder dan uap yang dihasilkannya dialirkan ke turbin [9]. Proses fisi di dalam teras reaktor mampu memanaskan gas helium hingga mencapai temperatur 950°C dengan efisiensi termal diharapkan mencapai 40%. Setelah terjadi pertukaran panas dengan sistem sekunder, temperatur gas helium akan turun menjadi 250°C, selanjutnya gas helium dipompakan lagi menuju teras reaktor. Sistem pendingin primer yang radioaktif dan sistem pendingin sekunder yang tidak radioaktif terpisah, konseptual desain sistem RGTT200K, dan geometri kernel *TRISO* hingga *pebble* masuk teras RGTT200K ditunjukkan pada Gb. 1 [9] dan Gb. 2 [10].



Gb. 1. Konseptual desain sistem RGTT200K[9].



Gb. 2. Geometri konseptual desain kernel *TRISO*, *pebble* dan teras RGTT200K[10].

2.2. Perhitungan Perpindahan Panas

Reaktor nuklir pada dasarnya mampu menghasilkan daya yang diinginkan selama panas yang dihasilkan dapat dipindahkan dari teras. Perhitungan dilakukan menggunakan program *THERMIX*. Program ini diturunkan berdasarkan hukum kesetimbangan massa, tenaga dan momentum linier. Persamaan kesetimbangan massa gas pendingin kuasi-statik menghasilkan vektor aliran massa $G = \rho_G \vec{v}$ pada siklus perhitungan, yang dinyatakan dengan persamaan (1)[8]:

$$\nabla \rho_G \vec{v} = q \tag{1}$$

dengan:

ρ_i = densitas gas pendingin (kg.m⁻³)

\vec{v} = kecepatan (m.detik⁻¹)

Konservasi momentum kuasi-statik menghasilkan vektortekanan p pada siklus perhitungan, dinyatakan dengan persamaan (2)[8]:

$$\nabla p - \rho_G \vec{g} + \vec{R} = 0 \tag{2}$$

dengan:

p = tekanan statik (kg. m⁻¹s⁻²)

\vec{g} = percepatan gravitasi (m.detik⁻²)

\vec{R} = penurunan tekanan (kg.m⁻¹s⁻²)

Persamaan(2) memberikan kesetimbangan gradien tekanan, gaya hidrostatis gravitasi, dan penurunan tekanan persatuan volume. Penurunan tekanan akibat friksi diberikan pada persamaan (3)[8]:

$$\vec{R} = \psi \frac{H}{d} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{1}{2\rho_G} \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2 \quad (3)$$

dengan:

- d = diameter *pebble* (m)
- m = laju alir massa fluida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- ε = porositas *bed*
- H = tinggi teras (m)
- A = luas tampang lintang (m^2)
- ρ_G = densitas fluida (kg m^{-3})
- ψ = koefisien penurunan tekanan untuk aliran melalui *pebble bed*

Evaluasi persamaan (1) dan (2) dilakukan dalam subrutin *STROEM*.

Hukum kekekalan energi pada representasi kuasi-statik menghasilkan vektor temperatur gas T_G dengan persamaan 4 [8]:

$$\nabla \lambda_G \nabla T_G - \nabla (\rho_G \vec{v}_p T_G) + \alpha A_p (T - T_G) = 0 \quad (4)$$

dengan:

- c_p = kapasitas panas spesifik gas ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}$)
- λ_G = konduktivitas termal efektif gas akibat dispersi ($\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)
- T = temperatur padatan, misal permukaan elemen bakar (°C)
- α = koefisien transfer panas antara padatan dan gas persatuan volume ($\text{W.m}^{-3}.\text{°C}$)
- A_p = luas permukaan zona *pebble* (m^2)
- T_G = temperatur fluida gas helium pendingin (°C)

Koefisien transfer panas konveksi diberikan oleh persamaan(5)[8]:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_g}{d} \quad (5)$$

Dimana Nu adalah bilangan Nusselt, λ_g adalah konduktivitas termal gas ($\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$) dan d adalah diameter *pebble* bahan bakar.

Persamaan (4) dievaluasi pada subrutin *GASTEM*. Pada persamaan (4) suku pertama memberikan transfer panas pada gas melalui konduksi termal. Suku kedua merupakan transfer panas sesuai aliran massa gas. Suku ketiga adalah sumber panas atau penyerap panas (*heat sink*) akibat transisi panas antara gas dan elemen bakar. Untuk vektor temperatur tertentu T dari *solid material*, status kuasi-statik gas diturunkan oleh subrutin *KONVEK*, dimana perhitungan ini mengandung suatu prosedur iterasi antara subrutin *STROEM* dan *GASTEM*. Hukum kekekalan energi pada *solid material* dievaluasi pada representasi dinamis, yang menghasilkan vektor temperatur T , ditunjukkan pada persamaan (6)[8]:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \nabla \lambda_{eff} \nabla T + \alpha(T_G - T) + Q \quad (6)$$

dengan

- T = $T(\vec{r}, t)$ temperatur padatan, misal permukaan elemen bakar (°C)
- ρ = densitas *solid material*, (kg/m^3)
- c = panas spesifik (J/kg.K)
- λ_{eff} = konduktivitas termal efektif ($\text{W. m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)
- Q = $Q(\vec{r}, t)$ nuclear heat source (W.m^{-3})

Pada bagian dalam elemen bakar, distribusi temperatur T_F juga diberikan oleh hukum kekekalan energi yang dinyatakan sebagai fungsi waktu, seperti ditunjukkan pada persamaan (7)[8]:

$$\frac{\partial(\rho c T_F)}{\partial t} = \nabla \lambda \nabla T_F + Q \quad (7)$$

Dimana c dan λ adalah bergantung pada temperatur lokal T_F . Pada permukaan elemen bakar, temperatur T_F sama dengan T dari persamaan (4) pada posisi di dalam reaktor. Persamaan (6) dan (7) diselesaikan dalam subrutin *TFELD* pada kondisi tunak, terdapat suatu prosedur iterasi antara subrutin *TFELD*

dan *KONVEK*, yang menghasilkan suatu solusi yang konsisten untuk temperatur *solid material* dan gas.

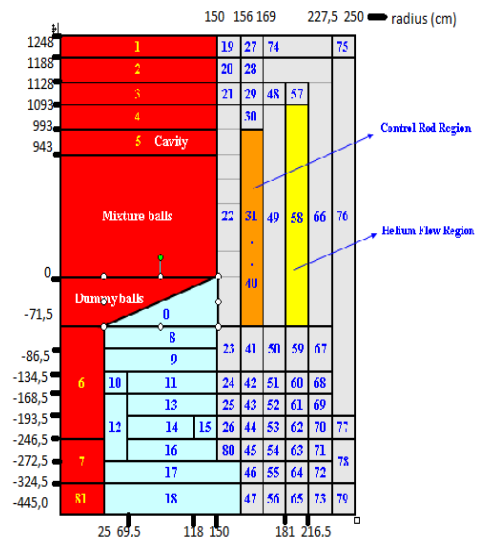
3. Metodologi

Penelitian ini dilakukan melalui pemodelan, perhitungan, dan analisis hasil. Pemodelan RGTT200K didasarkan pada desain bahan bakar yang terdiri atas partikel bahan bakar berlapis. Partikel bahan bakar tersebut berupa *Low Enriched Uranium–Triple Coated Isotropic (LEU-TRISO)* yang terkandung dalam suatu bola grafit, memiliki komposisi kernel UO_2 yang dilapisi oleh penyangga karbon berpori, piro karbon bagian dalam (*inner pyrolytic carbon, IPyC*), silikon karbida (SiC), dan piro karbon bagian luar (*outer pyrolytic carbon, OPyC*). Partikel-partikel berlapis ini membentuk bahan bakar *pebble* dengan diameter 6 cm [11].

Geometri partikel berlapis *TRISO* dan parameter *pebble* serta konseptual desain teras RGTT200K ditunjukkan masing-masing pada Gb.2 [10]. Setiap lapisan partikel *TRISO* memiliki fungsi spesifik dalam unjuk kerja bahan bakar, salah satu diantaranya adalah mencegah kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Partikel berlapis tersebar dalam matrik grafit dan terdistribusi secara acak dalam sel *pebble* bahan bakar, dalam sebuah sel *pebble* terdapat puluhan ribu partikel berlapis *TRISO* [2].

Pemodelan teras RGTT200K ditunjukkan pada Gb.3 [11], sedangkan penjelasan gambar pada Tabel 1. Sisi *inlet* adalah bagian atas teras, yang dimulai dengan zona kavitas, sebelum masuk ke zona teras reaktor (titik 0), sedangkan sisi *outlet* berada di posisi bawah. Di dalam program *THERMIX*, pada gambar tersebut konfigurasi teras RGTT200K dibagi menjadi sejumlah zona. Dalam pemodelan zona radial (R) dibagi menjadi 25 nodal, sedangkan ke arah aksial (z) dibagi menjadi 42 nodal. Di sisi *outlet* terletak corong tempat keluaran bahan bakar yang telah habis masa pakainya. Program komputer ini mempertimbangkan aspek-aspek neutronik, dinamik fluida dan perpindahan panas. Program komputer *THERMIX* dapat dimodelkan untuk menganalisis zona-zona teras

dengan masing-masing tingkat daya dan juga aliran pendingin yang berbeda. Pada masing-masing zona, kearah radial dapat direpresentasikan zona elemen bakar dan zona pendingin, sedangkan ke arah aksial dapat direpresentasikan rapat daya.



Gb.3. Pemodelan teras RGTT200K [11]

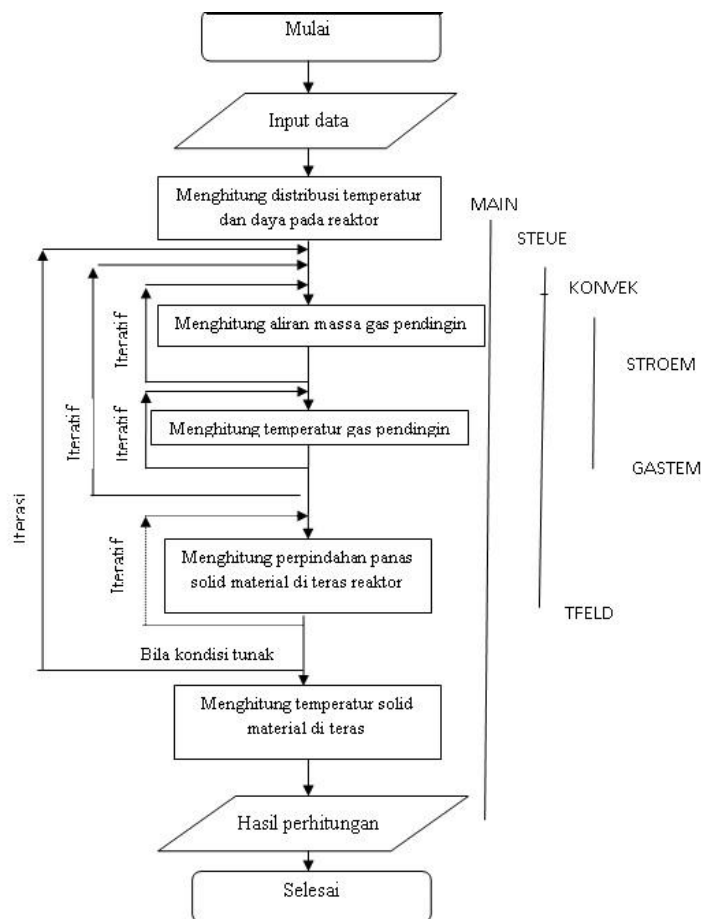
Tabel 1. Struktur teras.

No.	Nama Material
0	: Reflektor bagian <i>outlet</i>
1,17,19,55, 72,74,75,76, 77,78, 79	: Campuran karbon dan boron
2	: Reflektor grafit bagian <i>inlet</i>
3	: <i>Chamber</i> pendingin helium
4	: Reflektor <i>inlet</i>
5	: Ruang kosong bagian <i>inlet</i> teras
6,7	: Bola-bola <i>dummy</i> grafit
8 s/d 16	: Struktur reflektor bagian <i>outlet</i> dengan densitas berbeda-beda
18, 56, 65,73	: <i>Bricks</i> karbon
20,21,22,23, 24,25,26,27, 28,29,30-40, 41,42,43,44, 45,46,47,48, 9,50,51, 52, 53,54,57,66, 67,68, 9,70, 71,80,82, 58,59,60, 61,62,63	: aliran pendingin helium

Program komputer *THERMIX* menggunakan persamaan numerik dengan prinsip-prinsip kesetimbangan energi. Korelasi-korelasi yang digunakan adalah korelasi perpindahan panas, korelasi desain, korelasi sifat-sifat fisis helium,

korelasi moderator dan korelasi laju alir pendingin. Perhitungan transfer panas keseluruhan disintesis dari kopling persamaan fisis differensial yang mewakili hukum kekekalan. Persamaan tersebut

diselesaikan masing-masing dan sintesisnya dibuat dengan iterasi superposisi. Alur perhitungan program *THERMIX* dijelaskan pada diagram alir berikut ini :



Gb.4. Diagram alir Program *THERMIX*[8].

Input data perhitungan yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel 2, 3, 4 dan 5.

Tabel 2. Data input geometri bahan bakar *TRISO*[11]

No.	Jenis material	Nilai
1.	Material kernel	= $(^{235}\text{U}/^{238}\text{U})$
2.	Densitas UO_2	= 10,40 g/cm ³
3.	Diameter kernel	= 500 μm
4.	Ketebalan material coating dari dalam	= 90/40/35/35 μm
5.	Densitas material coating dari dalam	= 0,9/1,85/3,2/1,85 g/cc
6.	Material matrik bahan bakar	= grafit
7.	Material coating dari dalam	= <i>Buffer/IpyC/SiC/OPyC</i>

Tabel 3. Data input geometri bahan bakar *pebble*[11]

No.	Geometri	Nilai
1.	Diameter luar bahan bakar bola	= 60 mm
2.	Diameter dalam bahan bakar bola	= 50 mm
3.	<i>Fuel loading, g/sphere</i>	= 6,15 mm
4.	Pengkayaan	= 10 %
5.	Tebal grafit lapisan luar	= 0,5 cm

Tabel 4. Data input geometri teras[11]

No.	Parameter	Nilai
1.	Ketinggian teras	= 943 cm
2.	Diameter matrik bahan bakar	= 5 cm
3.	Diameter teras	= 300 cm
4.	Densitas grafit	= 1,70 g/cm ³

Tabel 5. Data input termal[11].

No.	Parameter	Nilai
1.	Laju alir	= 120 kg/detik
2.	Temperatur gas inlet	= 470 °C
3.	Daya termal	= 200 MWt

Untuk menganalisis perpindahan panas *solid material* di dalam dan di luar teras RGTT 200K, dipilih beberapa titik pengamatan yang disajikan, seperti di tunjukkan dalam Tabel 6. Pada perhitungan ini material teras dipandang sebagai *solid material*. Posisi material di teras dipandang sebagai lapisan dengan jejari tertentu.

Tabel 6. Titik pengamatan *output*.

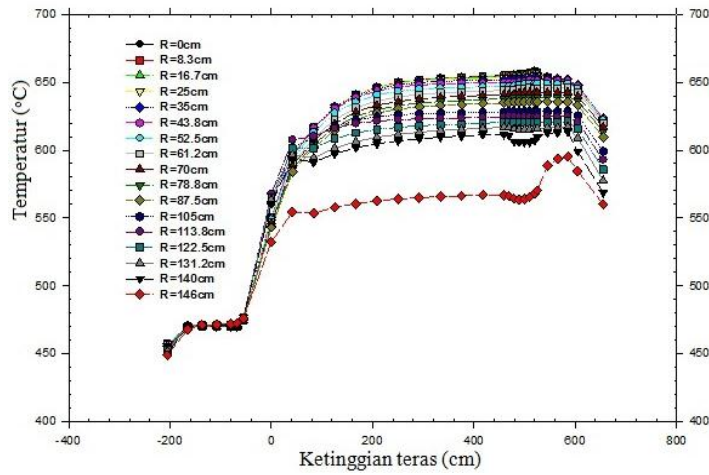
Posisi	Titik pengamatan
Radial	: <i>Solid material</i> berupa bahan bakar pada R=0 cm (tengah) hingga R=146 cm; sedangkan <i>solid material</i> di luar teras dari R=152 cm hingga R=468 cm.
Aksial	: 0 cm hingga 943 cm
Zona	: 5 lapisan zona kelongsong Z=1 hingga Z=5 Z=1; lapisan O-Pyc Z=2; lapisan SiC Z=3; lapisan Ipc Z=4; lapisan <i>buffer</i> Z=5; kernel UO ₂

4. Hasil dan pembahasan

4.1. Temperatur *Solid Material* di dalam Teras Reaktor

Perpindahan panas di dalam reaktor terjadi melalui mekanisme perpindahan panas konduksi pada arah aksial dan radial yaitu antara *pebble* dan *pebble*, *pebble* dan reflektor dan antara seluruh *solid material*. Perpindahan panas

konveksi berlangsung antara partikel partikel *pebble bed* dan aliran gas helium sebagai pendingin, sedangkan perpindahan panas radiasi terjadi antara *pebble* dan *pebble*, *pebble* dan dinding reflektor serta *core barrel* dengan dinding bejana tekan (*RPV=reactor pressure vessel*). Hasil perhitungan distribusi temperatur *solid material* sebagai fungsi posisi di dalam teras ditunjukkan pada Gb.5. Pengamatan temperatur *solid material* sebagai fungsi posisi (R,Z) arah radial dilakukan pada R=0 cm hingga R=146 cm (di dekat lapisan *near wall*), sedangkan arah aksial dari posisi Z=0 cm hingga Z=943 cm. Temperatur *solid material* cenderung mengalami penurunan sebagai fungsi posisi radial atau bertambahnya jejari teras. Pada posisi dengan jejari R=146 cm terlihat adanya perbedaan yang cukup signifikan terhadap temperatur *solid material* di posisi tersebut dibandingkan dengan posisi jejari lainnya. Hal ini dapat disebabkan karena adanya distribusi pendingin yang tinggi di posisi tersebut. Gambar tersebut juga menunjukkan bahwa temperatur *solid material* di bagian tengah teras (z=0) memiliki nilai terpanas, dibandingkan nilai temperatur lainnya, dan tampak menurun secara linier ke arah pinggir teras (*near wall*), sesuai dengan distribusi faktor puncak daya radial. Sementara itu distribusi temperatur di bagian atas teras berangsur-angsur semakin meningkat ke arah bawah teras. Perpindahan panas di zona bagian bawah teras berbeda dibandingkan zona di atasnya, yang disebabkan karena beban gravitasi dan kontak elastis antara bola-bola *pebble* yang saling bersinggungan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa temperatur *solid material* di zona teras aktif mencapai nilai maksimum sebesar 658°C.



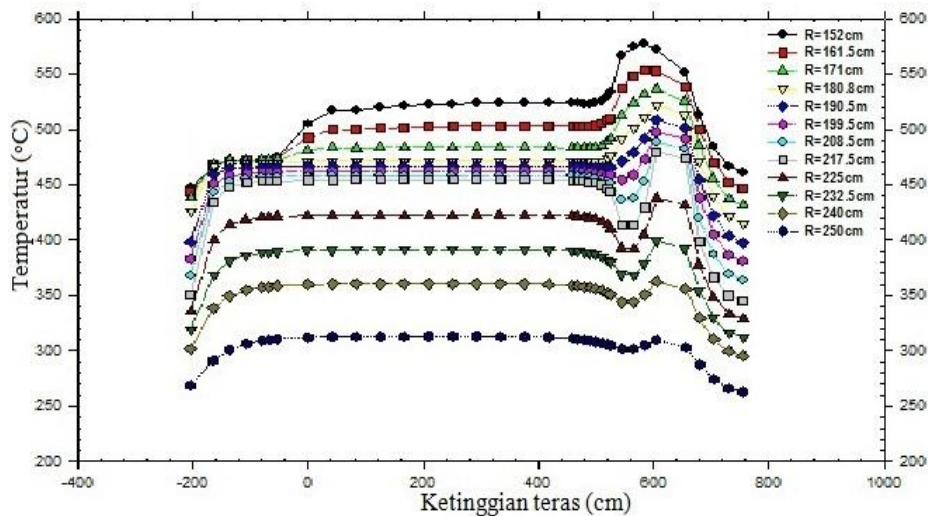
Gb.5.Temperatur *solid material* sebagai fungsi posisi di dalam teras reaktor.

4.2.Temperatur *Solid Material* di luar Teras Reaktor

Hasil perhitungan temperatur *solid material* sebagai fungsi posisi diluar teras ditunjukkan pada Gb.6.Temperatur *solid material*di luar teras reaktor cenderung menurun sebagai fungsi posisi radial. Hal ini disebabkan karena material tersebut semakin menjauhi sumber panas, dan adanya proses rambatan panas secara konduksi ke arah radial. Tampak pada gambar tersebut temperatur *solid material* sebagai fungsi posisi (R,Z) mengalami penurunan, berturut turut material di reflektor bagian dalam, reflektor luar, kanal/saluran pipa gas helium dan perisai reaktor. Posisi *solid material* R= 448 hingga R=468 adalah zona perisai reaktor.

Pola temperatur *solid material* mengikuti pembangkitan panas yang dihasilkan bahan bakar di dalam teras reaktor, mengingat bahwa

konduktansi material sepanjang arah aksial adalah tetap, sementara temperatur aliran gas helium di dalam teras reaktor yang mengalir ke bawah (*downward*) semakin bertambah (Q bertambah) maka temperatur *solid material* juga demikian. Material yang berada di posisi dekat dengan bahan bakar memiliki temperatur tertinggi, terjadi peningkatan temperatur sesuai arah aliran gas helium sebagai fungsi arah aliran secara aksial. Gambar tersebut juga menunjukkan terjadi pola distribusi temperatur *solid material* sebagai fungsi posisi. Pada posisi *inlet* gas ke teras, temperatur *solid material* terpanas sebesar 348°C, secara aksial temperatur ini meningkat hingga mencapai nilai maksimum 578°C. Temperatur menurun di sisi *outlet* menjadi 470°C, sedangkan temperatur dinding luar mendekati udara luar (*ambient temperature*) sebesar 50°C.

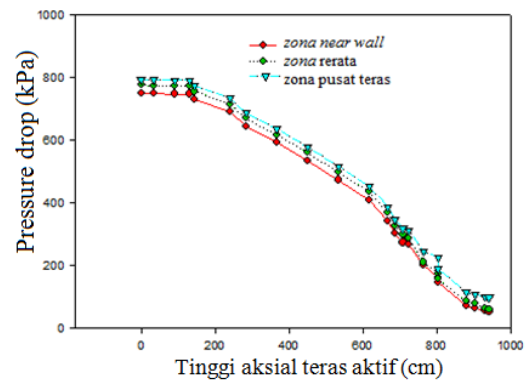


Gb.6.Temperatur *solid material* sebagai fungsi posisi di luar teras reactor.

4.3. Distribusi Pressure Drop dan Temperatur Pendingin Gas Helium

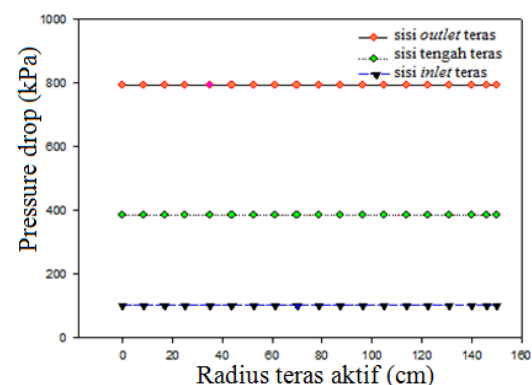
Pendingin helium memasuki teras reaktor dari bagian atas dan mengalir ke bawah melalui rongga antar bola-bola *pebble*, mentransfer panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi nuklir, kemudian meninggalkan teras menuju *IHX* (*Intermediate Heat Exchanger*) untuk dimanfaatkan panasnya secara bertingkat. Fluida pendingin berupa gas helium dialirkan dengan debit 120 kg/detik dan tekanan *inlet* 5000 kPa melalui saluran pendingin dari sisi *outlet* teras, disirkulasikan menuju bagian *inlet* kemudian mengalir masuk ke dalam teras. Gas helium memindahkan panas di sela-sela bahan bakar *pebble* secara konveksi paksa, dalam proses ini terjadi penurunan tekanan gas karena adanya friksi dengan permukaan bahan bakar *pebble*. Distribusi *pressure drop* aliran fluida pendingin sepanjang arah aksial di zona pusat teras, rerata dan *near wall* teras reaktor ditunjukkan pada Gb.7.

Pressure drop gas helium di dalam *pebble bed* disebabkan karena terjadinya friksi antara aliran pendingin gas melalui tumbukan dengan bola-bola *pebble*, dan dengan struktur teras. *Pressure drop* yang besar melewati sepanjang teras *pebble bed* dapat disebabkan kebocoran atau terjadinya aliran *bypass*. Selain itu semakin tinggi reaktor maka *pressure drop* juga semakin besar. *Pressure drop* di sepanjang *pebble bed* karena adanya friksi merupakan fenomena penting yang pada akhirnya menghasilkan perpindahan panas yang efektif. Penyebab terjadinya *pressure drop* seperti ukuran mesin turbo yang tepat juga menentukan distribusi aliran melalui struktur teras utama yaitu blok grafit. Bila terjadi *pressure drop* yang besar di sepanjang *pebble* yang disebabkan terjadinya kebocoran atau terjadinya aliran *bypass* melalui struktur teras, maka hal ini biasanya akan diminimisasi oleh desain. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *pressure drop* di sisi *inlet* pada masing-masing zona pusat teras, rerata dan *near wall* berkisar antara 54 kPa hingga 100 kPa, sementara di sisi *outlet* pada zona yang sama berkisar antara 750 kPa hingga 794 kPa.



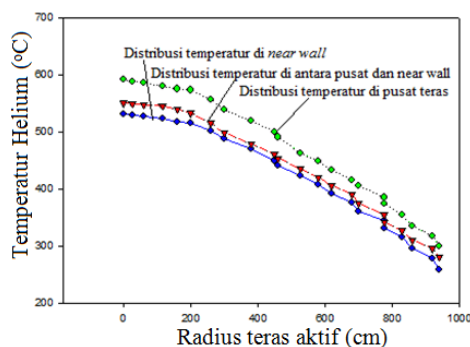
Gb.7. *Pressure drop* pendingin sepanjang arah aksial di zona pusat, rerata dan *near wall* teras reaktor.

Profil *pressure drop* pada arah radial diamati pada tiga posisi yaitu di zona *inlet* teras, tengah (*center*) teras, dan *outlet* seperti ditunjukkan pada Gb.8. Tampak pada gambar tersebut *pressure drop* mengalami peningkatan sebagai fungsi ketinggian teras reaktor, sementara pada zona radial yang sama, nilainya relatif sama. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *pressure drop* di zona *inlet* dan *outlet* berkisar antara 101 kPa hingga 794 kPa.



Gb.8. *Pressure drop* pendingin arah radial di zona sisi *outlet*, *inlet* dan tengah teras reaktor.

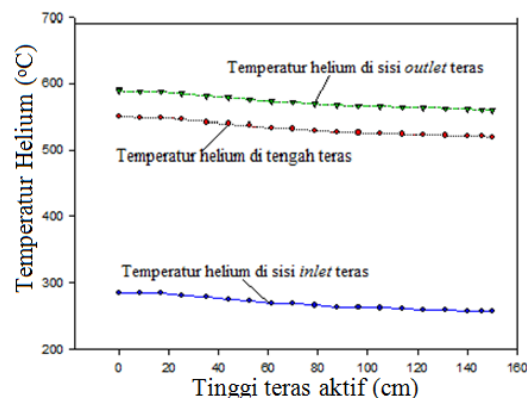
Gas helium sebagai pendingin diinjeksikan ke dalam teras reaktor di sisi *inlet* dengan laju 120 kg/s dan temperatur 250°C. Gradien temperatur mengalami peningkatan sebagai fungsi ketinggian teras reaktor seperti ditunjukkan pada Gb.9.



Gb.9. Distribusi temperatur gas helium sebagai fungsi tinggi teras.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa temperatur pendingin di zona *inlet* berkisar pada 258°C hingga 300°C, sementara pada sisi *outlet* pada rentang 530°C hingga 590°C. Hal ini dapat dipahami karena adanya sumbangan panas dari hasil fisi bahan bakar yang berlangsung baik dengan mekanisme konveksi, maupun radiasi. Distribusi temperatur di radius tengah reaktor tampak sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan zona *near wall*, hal ini diperkirakan karena *solid material* di zona *near wall* tidak menyumbangkan panas. Perhitungan lebih rinci dilakukan pada distribusi temperatur pendingin dengan ketinggian teras masing-masing di zona *inlet*, tengah dan *outlet* teras reaktor seperti ditampilkan pada Gb.10.

Pendingin gas helium diinjeksikan melalui daerah kavitasi dengan temperatur sebesar 250°C. Distribusi temperatur gas helium tersebut setelah masuk sampai pada ketinggian 943 cm di bagian atas teras reaktor diperoleh relatif sama. Hasil distribusi temperatur di setiap zona *inlet*, zona tengah dan zona *outlet* pada arah radial teras reaktor, yaitu masing-masing diperoleh sebesar antara 254°C - 287°C, 521°C - 553°C dan pada kisaran 561°C - 592°C. Gradien temperatur untuk masing-masing zona kecil, hal ini disebabkan turbulensi pendingin gas di antara bola - bola *pebble bed* sehingga menyebabkan aliran pendingin di posisi ketinggian yang sama menjadi relatif homogen. Pada Gb.9 tampak bahwa kisaran temperatur pendingin antara zona *inlet* dengan zona tengah dan zona *outlet* berbeda dengan cukup signifikan, karena adanya pengaruh distribusi puncak daya.



Gb.10. Distribusi temperatur gas helium sebagai fungsi posisi di teras reaktor.

5. Kesimpulan

Dari analisis di atas dapat disimpulkan bahwa perpindahan panas *solid material* sebagai penyusun bejana reaktor yang diidentifikasi melalui letak atau posisi arah radial di luar teras berhasil disimulasikan, demikian pula dengan *solid material* di dalam teras yang merupakan moderator dan bahan bakar. Temperatur *solid material* tertinggi berada di zona tengah teras sebesar 658°C, sehingga integritas sistem pengungkungan produk fisi masih terjaga.

Ucapan terima kasih

Terimakasih kami sampaikan kepada Ristek, selaku pemberi dana PI-PKPP 2012, Drs. Putranto Ilham Yazid yang telah menjalankan program perhitungan VSOP, Dr. Hendro Tjahjono, Dr. Sigit Santosa dan Ir. Tagor Malem Sembiring selaku KPTF dan Kepala Bidang BPR-PTRKN, yang telah bersedia untuk mengoreksi dan berdiskusi serta memperkaya makalah ini.

Daftar pustaka

- [1] Anonymous, Rencana Strategik Tahun 2010-2014, Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN, No. Ident: RKN.0.0.0T.01.01.10.04, Jakarta, 2010.
- [2] S.A. Hosseini, Neutronic Analysis of A Gaseous Control System for The HTR-10 Reactor, J. Annals of Nuclear Energy 45 (2012) 80–85
- [3] J.M. Kendall, R.E. Bullock, Advanced Coated Particle Fuel Options, Proceeding,

- The 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing China, (2004) 1-9.
- [4] Y.H Zhenget. all., Thermal Hydraulic Analysis of A Pebble-Bed Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor With ATTICA3D and THERMIX Codes, J. Nuclear Engineering and Design, 246 (2012) 286-297.
- [5] Sudarmono, Validasi Program VSOP Pada Perhitungan Distribusi Temperatur Bahan Bakar RGTT200K, Sigma Epsilon, Majalah Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir, 16(2)(2012) 64-73.
- [6] Sudarmono, Analisis Thermal-Flow RGTT Dengan Program THERMIX, Sigma Epsilon, Majalah Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir, 17(2)(2013) 44-53.
- [7] S.Yamoahet. all., Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer Model for The Pebble Bed High Temperature Gas Cooled Reactor, Research J. Appl. Sci., Eng. Technol., 4(12)(2012)1659-1666.
- [8] E.Teuchert, U.Hansen, K.A.Haas, VSOP-Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation, JUL-2897, Forschungs-zentrum Julich GmbH, 1994.
- [9] M. D. Purwadi, Analisis dan Optimasi Desain Sistem Reaktor Gas Temperatur Tinggi RGTT200K dan RGTT200KT, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, 4(1)(2012) 1-13.
- [10] Suwoto, Sudarmono, Zuhair, H. Adrial, Perhitungan distribusi densitas daya teras RGTT200K menggunakan Program MCNP5v1.2, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah-Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2013, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATANYogyakarta, 26 Juni, (2013) 75-80.
- [11] Sudarmono dkk. Laporan Teknis Program Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekrayasa MENRISTEK-BATAN 2011: Desain Konseptual Teras RGTT200K dengan Daur Bahan Bakar Berbasis Uranium Thorium, No Ident. 19/KS.00.01/RKN 1.4/2011, Kawasan PUSPIPTEK Gedung 80 Serpong, 2011.