

VALIDASI PROGRAM VSOP PADA PERHITUNGAN DISTRIBUSI TEMPERATUR BAHAN BAKAR RGTT200K KONDISI TUNAK

Sudarmono

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN

ABSTRAK

VALIDASI PROGRAM VSOP PADA PERHITUNGAN DISTRIBUSI TEMPERATUR BAHAN BAKAR RGTT200K KONDISI TUNAK. Program VSOP telah dimiliki sejak 2010 akan tetapi belum dapat dijalankan baik dengan XP maupun Windows. Kini dengan adanya kompilator tipe G95, program VSOP dapat dijalankan dengan Windows7. Program VSOP tersusun oleh 12 modul, diantaranya adalah modul TRIGIT, BIRGIT, LIFE dan VSOP serta ZUT. Program ini memerlukan data input desain geometri reaktor dan spesifikasi bahan bakar. Tujuan validasi agar dapat digunakan untuk perhitungan distribusi temperatur di permukaan bola-bola bahan bakar adalah sebagai langkah awal penggunaan VSOP selanjutnya, hingga kondisi transien nantinya. Metodologi perhitungan dilakukan dengan membagi tinggi teras menjadi 15 nodal ke arah aksial, sedangkan arah radial menjadi 17 nodal. Temperatur bahan bakar pada sisi inlet berada pada kisaran 360°C, sedangkan temperatur outlet 812°C. Validasi program VSOP untuk perhitungan distribusi temperatur bahan bakar model *pebble bed* pada reaktor RGTT200K, yang dimodelkan pada arah radial teras dan fungsi ketinggian teras, dengan asumsi penggunaan data neutronik yang telah ada, dibandingkan dengan hasil perhitungan HTGR. Hasil validasi menunjukkan terdapat perbedaan perhitungan temperatur bahan bakar sebesar 1,6%.

Kata kunci: validasi, distribusi temperatur, RGTT200K, kondisi tunak, VSOP

ABSTRACT

VALIDATION OF VSOP PROGRAM ON THE CALCULATION OF THE RGTT200K FUEL TEMPERATURE DISTRIBUTION ON STEADY STATE CONDITION. VSOP program has been owned since 2010 but has not been able to run well with Windows and XP as well. Now with the G95 compiler type, VSOP program can be run with Windows7. VSOP program composed of 12 modules, including the module TRIGIT, Birgit, VSOP and ZUT LIFE. This program requires a data input of the reactor geometry design and fuel specifications. Sensitivity analysis conducted on the calculation of temperature distribution on the surface of the fuel balls as the first step for application of VSOP for thermal flow calculation of high-temperature gas reactors. Calculation methodology done by dividing the core to 15 nodal axial direction, whereas the radial direction to 17 nodal. Fuel temperature at the inlet side in the range of 360°C, while the outlet temperature of 812°C. VSOP validation program for the calculation of the temperature distribution of fuel in the reactor bed pebble models RGTT200K, radial direction is modeled on the reactor core as a axial function, neutronic assumption use of data that already exist, compared with the HTGR calculation. Validation results indicate there are differences in the calculation of the fuel temperature by 1.6%.

Key words: validation, temperature distribution, RGTT200K, steady state, VSOP

PENDAHULUAN

Energi nuklir merupakan salah satu energi alternatif yang dapat dimanfaatkan karena menghasilkan energi dalam jumlah relatif besar, bersih tidak menyebabkan limbah seperti hasil pembakaran batubara, sehingga tidak menyebabkan pemanasan global. Mengingat bahwa hingga kini Indonesia belum berhasil mewujudkan sumber energi nuklir sebagai salah satu kontributor pembangkit energi di Indonesia. Pada tahun 2010-2014 kegiatan ini bahkan telah menargetkan konseptual desain RGTT 200K sebagai salah satu Tusi PTRKN^[1,2].

RGTT200K adalah jenis reaktor yang

menggunakan pendingin gas Helium (He) dan moderator grafit. Reaktor ini mampu menghasilkan panas hingga 950 °C dengan efisiensi thermalnya sekitar 40 %. Panas yang dibangkitkan dalam teras reaktor dipindahkan menggunakan alat penukar kalor untuk mentransfer energi panas dari satu sistem fluida ke sistem fluida yang lain tanpa terjadi pencampuran massa fluida.^[3] Elemen bahan bakar yang digunakan dalam reaktor gas temperatur tinggi berbentuk bola, tiap elemen mengandung 192 gram carbon dan 0,96 gram ²³⁵U. Proses fisi di dalam teras reaktor mampu memanaskan gas He hingga mencapai temperatur 950 °C. Setelah terjadi pertukaran panas dengan sistem sekunder,

temperatur gas helium akan turun menjadi 250°C. Gas He selanjutnya dipompakan lagi. RGTT200K membutuhkan bahan bakar bola berdiameter 60 mm sebanyak 675.000 butir yang diletakkan di dalam teras reaktor. Rata-rata setiap butir bahan bakar tinggal di dalam teras selama enam bulan operasi penuh^[4].

Keselamatan operasi reaktor dibatasi oleh temperatur bahan bakar di seluruh teras reaktor. Agar integrasi bahan bakar tetap terjaga tidak rusak (pecah atau meleleh) maka temperatur bahan bakar harus berada di dalam kriteria lisensi/pembatas yang diijinkan yaitu masing masing harus lebih kecil dari 2840°C^[5].

PTRKN telah memiliki program perhitungan VSOP, yang baru dapat dijalankan setelah menggunakan kompiler tipe G95. Status ilmiah mengenai program VSOP di PTRKN adalah baru dapat dijalankan, untuk itu langkah pertama yang harus dilakukan adalah memvalidasi program perhitungan. Tujuan Validasi dilakukan untuk menghitung distribusi temperatur bahan bakar di permukaan bola bola bahan bakar sebagai fungsi posisi di dalam teras reaktor, agar diperoleh kepercayaan dalam penggunaan program VSOP selanjutnya.

Metodologi perhitungan dilakukan dengan menggunakan program VSOP. Program VSOP tersusun dari 12 modul perhitungan, serta 2 opsi paket program perhitungan pembakaran yaitu Citation dan Thermix. Citation merupakan modul perhitungan yang berdasarkan teori difusi sebagai perhitungan fluks neutron di dalam teras dalam bentuk geometri multidimensi, sedangkan modul Thermix digunakan untuk perhitungan distribusi temperatur bahan bakar^[6].

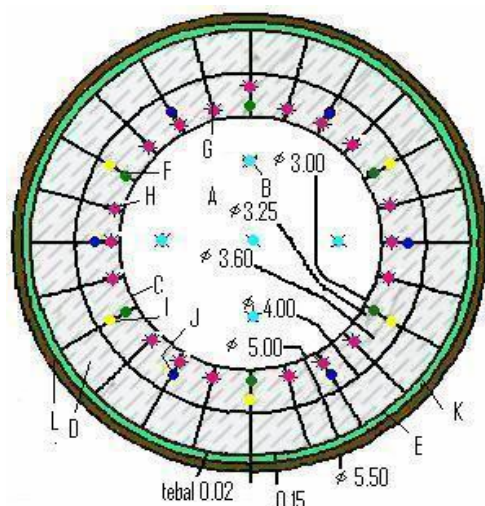
TINJAUAN PUSTAKA

Temperatur bahan bakar merupakan salah satu parameter keselamatan pada pengoperasian reaktor nuklir. 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 temperatur. Untuk memperoleh distribusi temperatur bahan bakar digunakan paket program VSOP (*Very Superior Old Program*), yang dikembangkan oleh *HTR-DRAGON European*, program ini ditulis dalam bahasa fortran 77 dan membutuhkan sistem penyimpan 17 M-Bytes. VSOP merupakan program perhitungan distribusi temperatur bahan bakar di teras reaktor HTGR^[6].

Desain konseptual 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 pembawa energi yang sangat efisien dan ramah lingkungan. Desain konseptual RGTT200K merupakan pengembangan desain konseptual reaktor kogenerasi dengan tingkat daya menengah yang berpendingin gas helium. 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 dimasukkan kembali ke dalam bejana reaktor dari bagian atas. Dengan demikian, seiring dengan berlangsungnya operasi reaktor, posisi bola bahan bakar tidak statis tetapi bergerak secara perlahan dari atas bejana ke arah bawah bejana.

Desain konseptual teras RGTT200K seperti ditunjukkan pada Gambar 1, menggunakan bahan bakar tipe *pebble* yang terdiri atas partikel bahan bakar berlapis *Tristructural-ISotropic* (TRISO)^[7].



Gambar 1. Desain konseptual teras RGTT200K arah radial

1. Teras *pebble bed*
2. Tempat penyimpanan bahan bakar bola
3. Reflektor bagian dalam
4. Reflektor bagian luar
5. Perisai teras
6. Kanal-kanal batang kendali
7. G,H Kanal-kanal tempat masuknya bahan bakar bola
8. I. Kanal-kanal tempat sirkulasi bahan bakar berbentuk bola
9. J. Kanal-kanal pendingin helium

10. K. Gap helium
11. L. Bejana tekan

Partikel bahan bakar berlapis desain konseptual teras reaktor maju dengan daur bahan bakar uranium-thorium memiliki komposisi kernel (UO_2) pada berbagai pengkayaan yang dilapisi oleh penyangga karbon berpori (*porous carbon buffer*, C), piro karbon bagian dalam (*inner pyrolytic carbon*, IPyC), silikon karbida (SiC), dan piro karbon bagian luar (*outer pyrolytic carbon*, OPyC).

Spesifikasi teknis bahan bakar partikel berlapis UO_2 untuk RGTT200K ditunjukkan pada Tabel 1. 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 bahan bakar *pebble*.

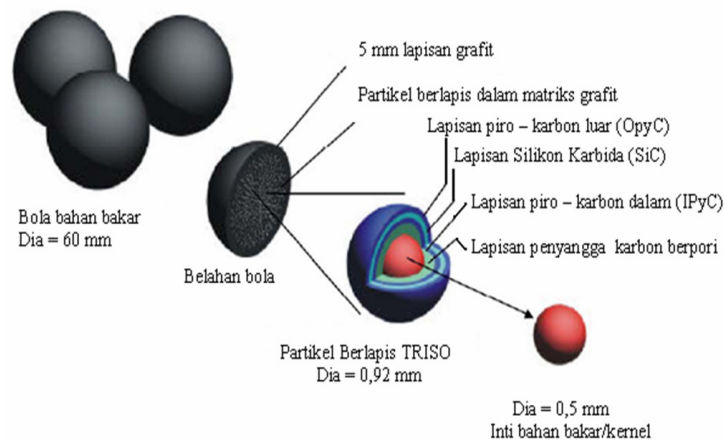
Tabel 1. Spesifikasi teknis bahan bakar partikel berlapis RGTT200K

TIPE KERNEL	$(3\text{Th,U})\text{O}_2$	
Radius kernel, cm	0,025	
Enrichment, % (U-235)	10	
Densitas kernel, gr/cc	10,40	
LAPISAN TRISO	Diameter dari dalam kernel ke luar (cm)/tebal (cm)	Densitas (gr/cc)
Lapisan penyangga karbon berpori (buffer)	0,0345/0,0095	1,05
Lapisan dalam piro karbon (IPyC)	0,0385/0,0040	1,90
Lapisan Silikon Karbida (SiC)	0,0420/0,0035	3,18
Lapisan luar piro karbon (OPyC)	0,0460/0,0040	1,90
PEBBLE-BED		
Diameter bola pebble, cm	6,00	
Diameter zona aktif bahan bakar, cm	5,00	
Tebal matriks grafit outer shell, cm	0,50	
Densitas matrik grafit outer shell, gr/cc	1,75	

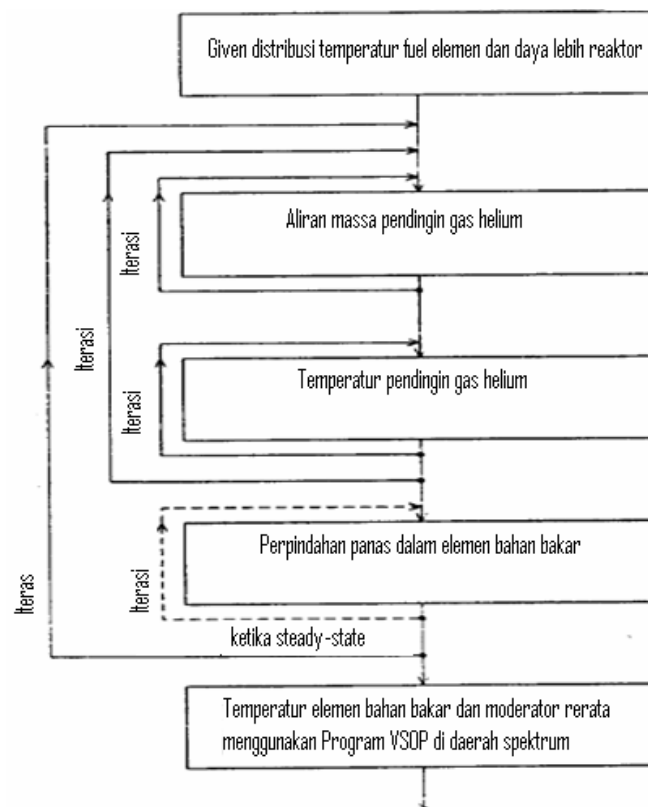
Dalam sebuah bahan bakar *pebble* terdapat puluhan ribu partikel berlapis *TRISO*. Skematik bahan bakar partikel berlapis *TRISO* desain konseptual RGTT200K ditunjukkan pada Gambar 2.

Program VSOP tersusun dari 12 modul perhitungan, serta 2 opsi paket program perhitungan pembakaran yaitu *Citation* dan *Thermix*. *Citation* merupakan modul perhitungan yang berdasarkan teori difusi sebagai perhitungan fluks neutron di dalam teras dalam bentuk geometri multidimensi,

sedangkan modul *Thermix* digunakan untuk perhitungan distribusi temperatur bahan bakar. Program ini disusun dari penggabungan aspek-aspek neutronik, fluida dinamik dan perpindahan panas, menggunakan persamaan numerik dengan prinsip-prinsip kesetimbangan energi. Korelasi perhitungan yang digunakan adalah korelasi perpindahan panas, korelasi desain, korelasi sifat-sifat fisis helium, korelasi moderator dan korelasi laju alir pendingin.



Gambar 2 . Bahan bakar RGTT200K



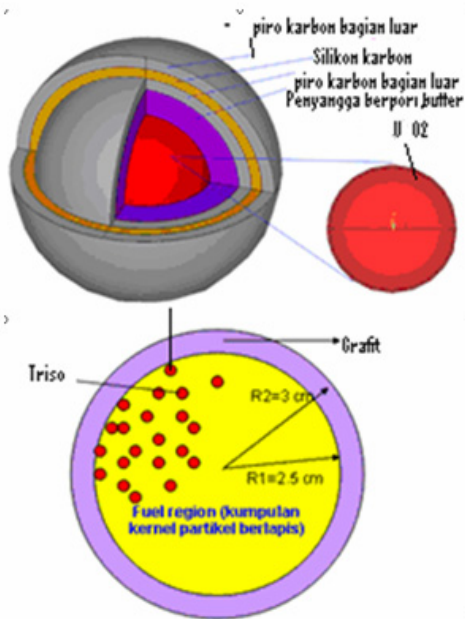
Gambar 3. Diagram alir perhitungan Program VSOP untuk distribusi temperatur

Program ini diturunkan berdasarkan hukum kesetimbangan massa, tenaga dan momentum linier. Persamaan kesetimbangan diatas diselesaikan secara matematis dengan memperhatikan adanya batasan yang ada didalam teras, seperti di tulis dalam persamaan 1,

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \nabla \lambda_{eff} \nabla T + \alpha(T_G - T) + Q \quad ..(1)$$

dimana ;

- T = T(r,t) temperatur bahan bakar, permukaan bahan bakar, reflector
- ρ = densitas
- c = kapasitas panas
- λ_{eff} = konduktivitas termal efektif
- α = koefisien panas transisi antara gas dan bahan bakar
- Q = $Q(r, t)$
- T_G = temperatur gas



Gambar 4. Model bahan bakar RGTT200K

Distribusi temperatur di dalam bahan bakar T_F juga di tentukan dari hukum konservasi energi seperti dalam persamaan 2.

dimana :

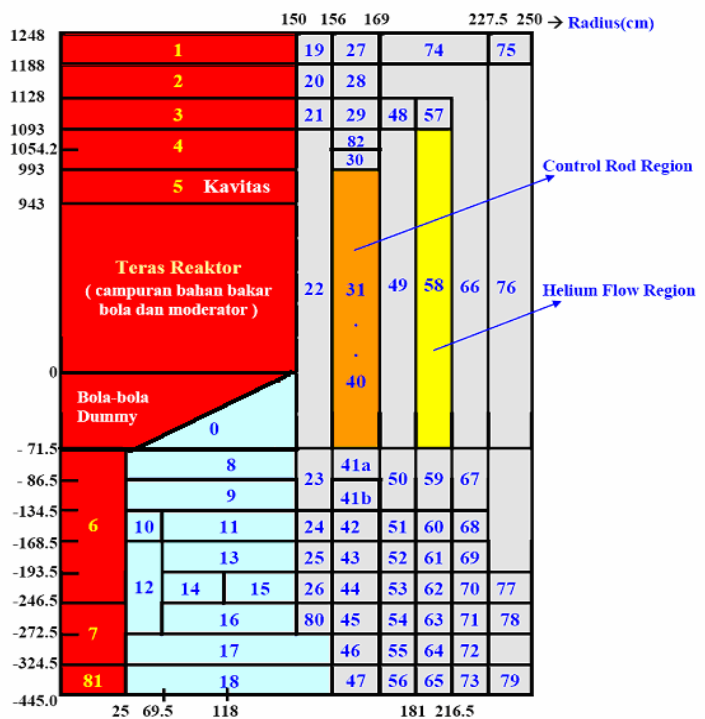
$$\frac{\partial(\rho c T_F)}{\partial t} = \nabla \lambda \nabla T_F + Q \quad(2)$$

variable c dan λ tergantung temperatur lokal T_F persamaan 1 dan persamaan 2 di selesaikan di dalam subroutine TFELD yang ada di dalam program VSOP.

METODOLOGI

Analisis validasi program VSOP pada perhitungan distribusi temperatur bahan bakar RGTT200K kondisi tunak model teras *pebble bed* didekati dengan :

1. Memodelkan bahan bakar RGTT200K seperti pada Gambar 4.
2. Memodelkan Teras RGTT200K seperti pada Gambar Memodelkan teras reaktor yang dibagi menjadi arah radial dan arah aksial, seperti di tunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain konseptual teras reaktor RGTT200K

Teras reaktor dibagi menjadi 81 bagian, dengan bagian- bagian tersebut adalah :

0	=	Reflektor bagian bawah
1,17,19,55	=	Campuran karbon dan boron
2	=	reflektor grafit bagian atas
3	=	<i>chamber</i> pendingin helium
4	=	reflektor atas
5	=	ruang kosong bagian atas teras
6,7	=	bola-bola dummy grafit
8 s/d 16	=	adalah Struktur reflektor bagian bawah dengan densitas berbeda-beda
20,21,22,23,24,25,26	=	reflektor grafit
27,28,29,30,30-40,41	=	reflektor grafit
42,43,44,45,46,47,48	=	reflektor grafit
82,49,50,51,52,53,54	=	reflektor grafit
57,66,67,68,69,70,71,80	=	reflektor grafit
64,72 74,75	=	Campuran karbon dan boron
76,77,78, 79	=	Campuran karbon dan boron
58,59,60, 62,63	=	lokasi pendingin helium

Tabel 1. parameter-parameter bahan bakar bola

(1)	Material kernel	=	(²³⁵ U/ ²³⁸ U)
(2)	Diameter kernel	=	500 μ m
(3)	Densitas kernel	=	10,9 g/cc
(4)	Material coating dari dalam	=	PyC/PyC/SiC/PyC
(5)	Ketebalan material coating dari dalam	=	90 /40 /35 /35 μ m
(6)	Densitas material coating dari dalam	=	0,9/1,85/3,2/1,85 g/cc
(8)	Diameter matrik bahan bakar	=	5 cm
(10)	Ketebalan lapisan terluar	=	0,5 cm
(11)	Diameter elemen bahan bakar	=	60 cm

(vi) Menentukan data masukan program VSOP, antara lain adalah :

daya	200 MWth
rapat daya	3 W/cc
diameter teras	3 m
tinggi teras	9,6 m
jumlah batang kendali	6
jumlah sistem penyerap bola bahan bakar	18
diameter bejana tekan	5,8 m
ketinggian bejana tekan	23,8 m
tekanan	60 atm
pengkayaan	17 %
fraksi bakar	80 GWd/t

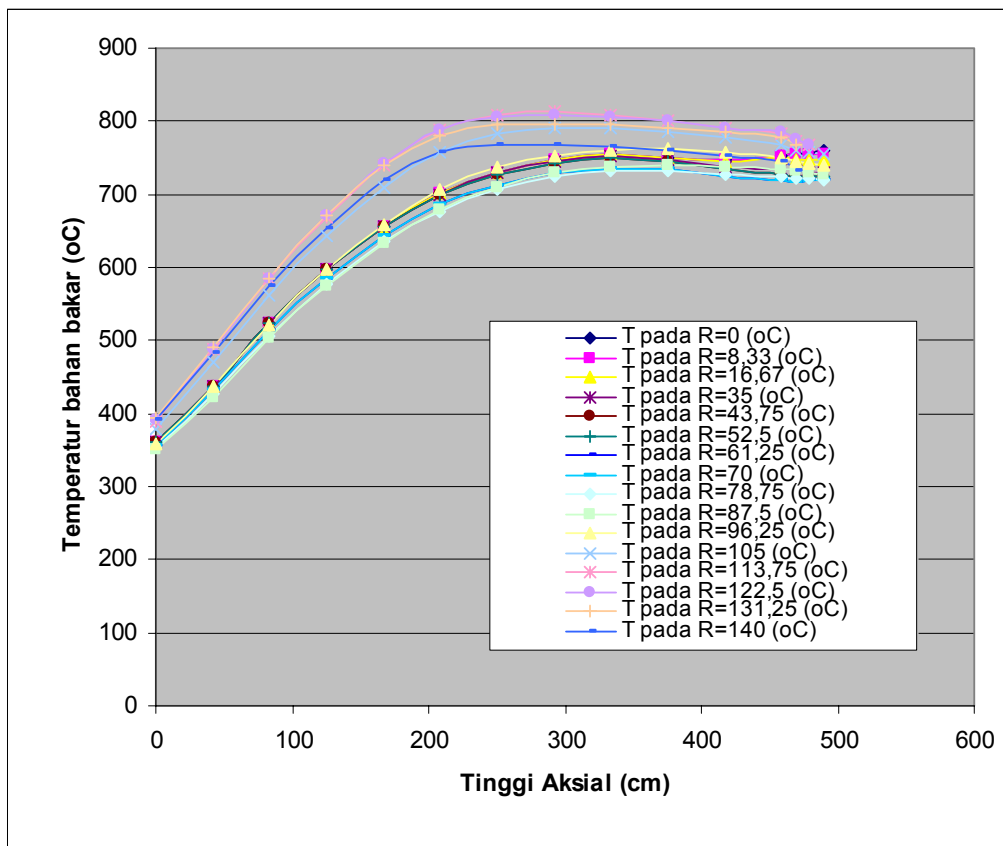
(vii) Menentukan data material matrik bahan bakar

diameter matrik bahan bakar	5 cm
material outer layer	grafit
ketebalan outer layer	0,5 cm
diameter elemen bahan bakar	60 cm

HASIL dan PEMBAHASAN

Untuk memperoleh validasi perhitungan distribusi temperatur dilakukan dengan membagi tinggi teras menjadi 15 nodal ke arah aksial, sedangkan arah radial menjadi 17 nodal. Titik 0 pada arah aksial menunjukkan bagian atas teras. Distribusi temperatur bahan bakar yang berada pada masing-masing posisi sebagai fungsi jarak aksial dan radial teras ditunjukkan pada Gambar 6. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa temperatur bahan

bakar meningkat sebagai fungsi jarak aksial. Panas yang dibangkitkan oleh bola-bola bahan bakar ditransfer oleh pendingin helium dengan arah aliran dari atas ke bawah. Perpindahan panas di dalam teras reaktor berlangsung secara konduksi, konveksi. Permukaan bola yang bersentuhan dengan permukaan bola lainnya akan memindahkan panas secara konduksi, sedangkan pada gap antar bola diambil oleh gas helium, secara konveksi.



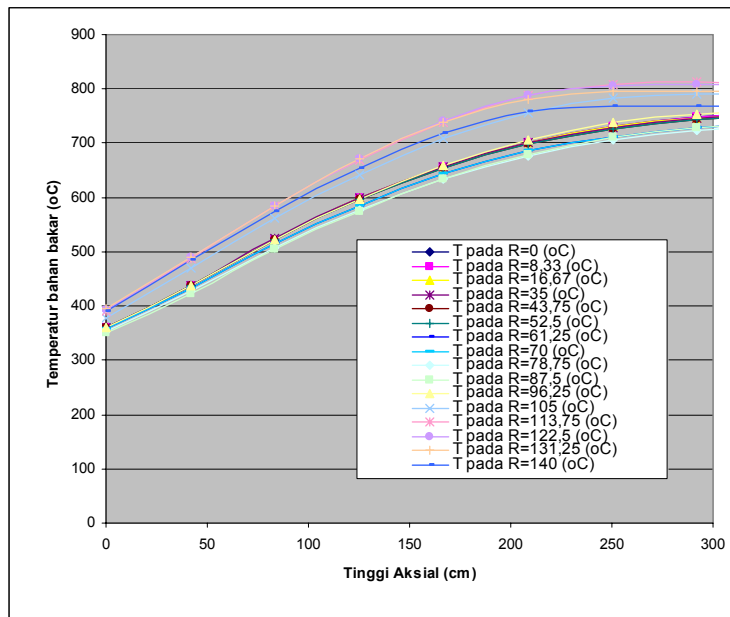
Gambar 6. Distribusi temperatur bahan bakar sebagai fungsi ketinggian teras reaktor

Gambar 7 dan Gambar 8 menggambarkan secara lebih jelas distribusi temperatur bola bola bahan bakar pada masing-masing setengah tinggi teras reaktor. Temperatur bahan bakar menunjukkan kecenderungan (trend) peningkatan temperatur.

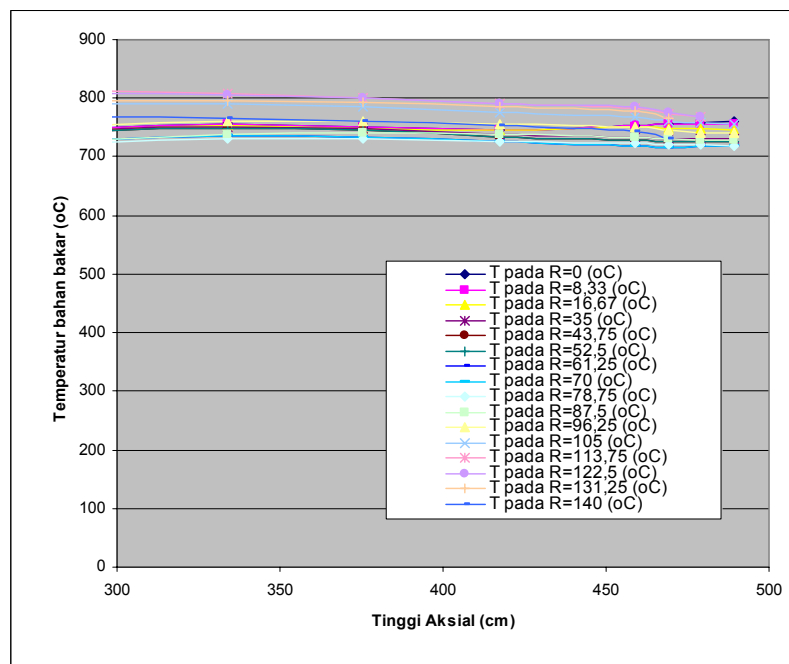
Kecenderungan ini terjadi hingga setengah tinggi teras. Temperatur permukaan bola bola bahan bakar terdistribusi cukup rata yang ditunjukkan oleh temperatur pada masing-masing jarak radial dari

pusat teras (titik $R = 0$ adalah sumbu imajiner bagian tengah teras reaktor).

Gambar 8 menunjukkan distribusi temperatur di sisi outlet teras. Temperatur di sisi ini terlihat lebih homogen, relatif tidak menunjukkan trend kenaikan lagi. Hal ini kemungkinan disebabkan karena temperatur di sisi outlet reaktif telah mencapai titik jenuh.



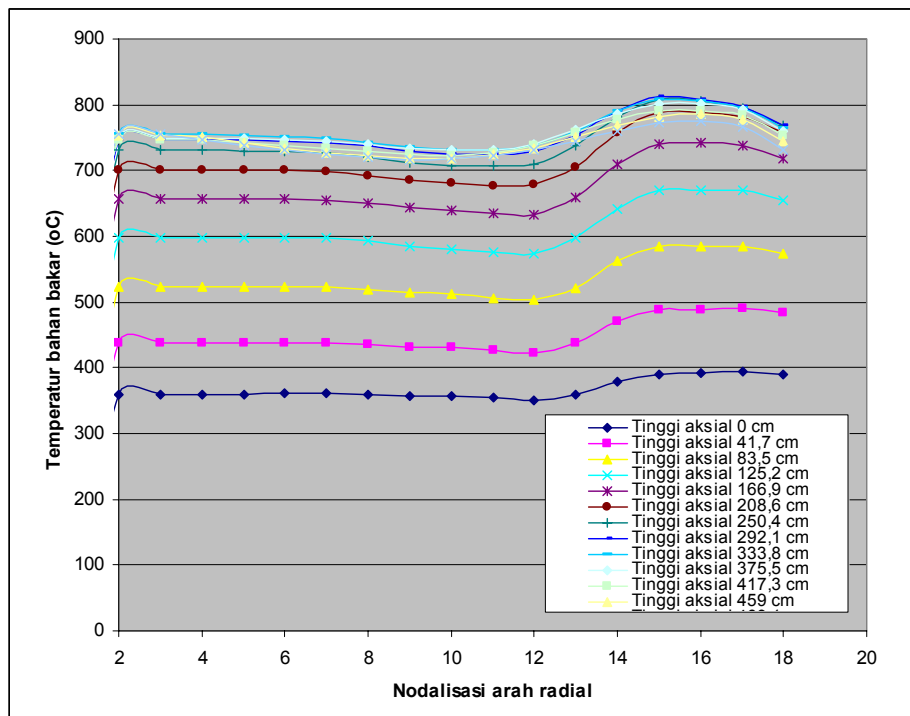
Gambar 7. Distribusi temperatur bahan bakar pada bagian bawah hingga tengah teras reaktor (*core mid plane*)



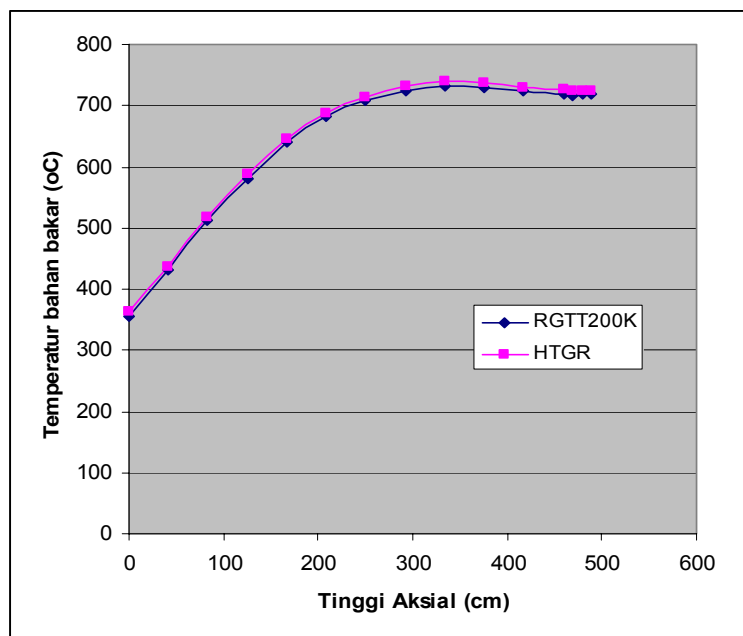
Gambar 8. Distribusi temperatur bahana bakar di bagian atas teras reaktor

Untuk mengetahui validitas distribusi temperatur bahan bakar ke arah radial dilakukan dengan menganalisis hasil perhitungan temperatur bahan bakar dengan nodalisasi ke arah radial. Hasil perhitungan distribusi temperatur pada masing-masing nodal ke arah radial teras reaktor ditunjukkan pada Gambar 9. Distribusi temperatur

pada masing-masing nodal ke arah radial memiliki kecenderungan yang sama, terjadi trend peningkatan temperatur pada bola-bola yang berada di dekat dinding reaktor, hal ini dapat dimengerti karena adanya tahanan dinding bejana terhadap aliran pendingin.



Gambar 9. Distribusi temperatur bahan bakar sebagai fungsi nodalisasi ke arah radial teras reaktor



Gambar 10. Perbandingan hasil perhitungan temperatur bahan bakar

Hasil perhitungan temperatur bahan bakar ini kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan yang sama untuk HTGR, di posisi $Z = 0$ dan $R = 70$ cm atau berada di posisi tengah teras reaktor, seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Terdapat perbedaan hasil perhitungan maksimum sebesar 1,6%. Hal ini membuktikan bahwa program perhitungan VSOP dapat digunakan untuk perhitungan selanjutnya termohidrolika reaktor jenis HTGR.

KESIMPULAN

Hasil validasi program VSOP untuk perhitungan distribusi temperatur bahan bakar model *pebble bed* pada reaktor HTGR, yang dimodelkan pada arah radial teras dan fungsi ketinggian teras, dengan asumsi penggunaan data neutronik yang telah ada, menunjukkan bahwa program VSOP valid untuk digunakan dalam perhitungan termal flow selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Rencana STRATEJIK Tahun 2010-2014, No. Ident : RKN.0.0.0T.01.01.10. Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, BATAN, 04 Maret 2010
- [WWW.Ristek go.id/file/upload/referensi/2010/ARN.pdf](http://www.ristek.go.id/file/upload/referensi/2010/ARN.pdf), Agenda Riset Nasional 2010-2014, Nomor : 193/M/Kp/IV/2010. Tanggal : 30.4.2010
- Mohammad Dhandhang Purwadi "Desain Konseptual Sistem RGTT200MWt Siklus Tak Langsung" Prosiding Seminar Nasional ke-17 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, 01 Oktober 2011
- IAEA-TECDO-988, "High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Development", Proceedings of a Technical Committee Meeting, Johannesburg-South Africa, 13-15 November 1996.
- Duderstadt J.J., Hamilton L.J., Nuclear Reactor Analysis New York, (1976), 490-498.
- E.Teuchert, U.Hansen, K.A.Haas : "V.S.O.P-Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation" Kernforschungsanlage Julich, JUL-1649. (1980)
- SUWOTO, ZUHAIR, MAMAN MULYAMAN, " Analisis Sensitivitas Parametrik Dalam Perhitungan Kritikalitas Sel Kisi Kernel Bahan Bakar RGTT", Prosiding Seminar Nasional Ke-15 Teknologi Dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir Surabaya, 28 Juli 2010.
- P.H. Liem, Batan-MPASS : "A General Fuel Management Code for Pebble-Bed High Temperature Reactors", accepted to be published in Ann. Of Nucl. Energy. (1993)."
- Jacobus Johannes Van Der Merwe : Verification and Validation of The PBMR
- Models and Codes used to Predict Gaseous Fission Product Releases From
- Spherical Fuel Elements, (2004).
10. IAEA-TECDOC-923, "Non-Electric Applications of Nuclear Energy", Proceeding of an Advisory Group Meeting, Jakarta – Indonesia, 21-23 November 1995.
11. H.C.Honeck: "THERMOS-A Thermalization Transport Theory Code for Reactor
- Lattice Calculation" Brookhaven National Laboratory, BNL-5826 (1961)
12. Vokan Seker, Thomas J.Downar: " Multiphysics Methods Development For High
- Temperature Gas Cooled Reactor Analysis. Turkey, June 3-8. 2007
13. IAEA, "Status of National Gas Cooled Reactor Program", International Working
- Group on Gas Reactors, Vienna – Austria, 1991.