

ANALISIS PERHITUNGAN DISTRIBUSI TEMPERATUR TERAS DAN REFLEKTOR REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL

Suwoto, Hery Adrial, Topan Setiadipura, Zuhair

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN

ABSTRAK

ANALISIS PERHITUNGAN DISTRIBUSI TEMPERATUR TERAS DAN REFLEKTOR REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL. Reaktor Daya Eksperimental (RDE) adalah salah satu jenis reaktor temperatur tinggi berpendingin gas helium yang pengoperasiannya harus memenuhi batas standar keselamatan operasi, khususnya dari aspek temperatur, sehingga penelitian tentang distribusi temperatur pada bahan bakar yang berada di teras dan reflektor reaktor sangat penting untuk dilakukan. Program PEBBED6 dirancang khusus untuk reaktor jenis PBR (*Pebble Bed Reactor*) berbahan bakar jenis bola dan dapat menghitung parameter neutronik dan distribusi temperatur pada teras reaktor maupun reflector dalam teras RDE menggunakan fraksi *packing* 61%. Perhitungan dan pemrosesan spektrum tampang lintang menggunakan program COMBINE dan perhitungan distribusi temperatur pada bahan bakar *pebble* dan daerah reflektor dilakukan dengan menggunakan modul THERMIX-VSOP yang sudah terintegrasi dengan program PEBBED6. Hasil perhitungan temperatur permukaan *pebble* pada bagian tengah dan atas teras aktif untuk tiga ketebalan reflektor 100 cm, 150 cm dan 200 cm masing-masing adalah 646,50 °C dan 761,30 °C, sementara temperatur permukaan *pebble* pada teras bagian tengah dan atas paling dekat dengan reflektor samping adalah 601,40 °C dan 695,80 °C. Sedangkan temperatur pada reflektor sisi samping bagian tengah dan atas terluar untuk ketebalan 100cm masing-masing adalah 413,20 °C dan 438,30 °C, sementara temperatur pada ketebalan reflektor 150 cm dan 200 cm adalah 340,80 °C dan 353,90 °C. Secara keseluruhan, hasil perhitungan menghasilkan distribusi temperatur permukaan bahan bakar teras dan reflektor yang berada pada nilai di bawah batas keselamatan temperatur yang dipersyaratkan.

Kata kunci: distribusi temperatur, reaktor daya eksperimental, PEBBED6, COMBINE, THERMIX-VSOP

ABSTRACT

CALCULATION ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION ON CORE AND REFLECTOR OF EXPERIMENTAL POWER REACTOR. *Experimental Power Reactor (RDE) is one type of high temperature gas-cooled reactor, which is cooled by helium gas and its operation should meet the safety standards of operation, particularly from the aspect of temperature, so that the research on temperature distribution in the core and reflector of the reactor is very important to be performed. The PEBBED6 code is designed specifically for the pebble bed reactor (PBR) type and it can calculate neutronic parameters and temperature distribution in the core and reflector of the RDE using packing fraction of 61%. Calculation and processing of cross section of the neutron spectrum are done using the COMBINE code and calculation of the temperature distribution can be done using THERMIX-VSOP module already integrated in the PEBBED6 code. The results of the temperature calculation of the pebble surface with three variations reflector thickness of 100cm, 150cm and 200cm in the middle and upper part of active core are 646.50 °C and 761.30 °C respectively. While the pebble surface temperature on the core of the middle part and on the side closest to the reflector are 601.40 °C and 695.80 °C respectively. Meanwhile, the temperatures on the outer side of the reflector middle and top part with the thickness of 100 cm are 413.20 °C and 438.30 °C respectively. While the temperatures on the reflector with the thickness of 150 cm and 200 cm are 340.80 °C and 353.90 °C respectively. Overall, the calculations result provide the surface temperature distribution of fuel core and reflector values, which is below the required safety limit for temperature.*

Keywords: *temperature distribution, experimental power reactor, PEBBED6, COMBINE, THERMIX-VSOP*

PENDAHULUAN

Reaktor Daya Eksperimental (RDE) ^[1,2,3] merupakan salah satu jenis reaktor temperatur tinggi berpendingin gas helium yang segera akan dibangun di Indonesia oleh BATAN di Kawasan PUSPIPTEK Serpong. Konsep dan desain Reaktor RDE mengacu pada HTGR (*High Temperature Gas-cooled Reactor*) dari teknologi Jerman yang telah diterapkan pada HTR-10 di Cina ^[4,5,6]. Reaktor RDE dirancang menggunakan bahan bakar kernel partikel berlapis (*coated fuel particle*) TRISO ^[7] yang berbentuk *pebble* (bola). Dalam operasinya reaktor RDE menggunakan kernel bahan bakar uranium dioksida (UO₂) dengan pengkayaan 17%. Namun sebenarnya secara teoretis, teras reaktor RDE ini dapat juga diisi dengan bahan bakar yang lainnya, seperti ThO₂ maupun PuO₂.

Reaktor RDE direncanakan berdaya termal 10 MWth (RDE-10) yang dapat menghasilkan temperatur keluaran teras sekitar 700 °C dan diharapkan dapat menghasilkan listrik sekitar 3 MWe. Selain menghasilkan listrik, reaktor HTGR diharapkan dapat menghasilkan panas dengan temperatur tinggi yang dapat digunakan untuk aplikasi proses panas industri lainnya, seperti pencairan batubara, EOR (*Enhanced Oil recovery*) dan lainnya.

Pengoperasian reaktor RDE-10 ini harus memenuhi standar batas keselamatan operasi sebuah reaktor nuklir, sehingga penelitian tentang distribusi temperatur pada bahan bakar yang berada teras dan reflektor reaktor sangat penting untuk dilakukan. Penelitian ini akan menggunakan simulasi kom-

puter yang tersedia di PTKRN-BATAN yaitu program PEBBED6 ^[8,9,10] yang telah terintegrasi dengan modul THERMIX dari VSOP'94. Integrasi lainnya adalah pemanfaatan tampang lintang data nuklir ENDF/B-VII yang dibangkitkan secara simultan dari program COMBINE-7 untuk menghitung spektrum neutron teras reaktor dan perhitungan tampang lintang yang akan digunakan.

Program komputer PEBBED6 yang dirancang khusus untuk reaktor jenis PBR (*Pebble Bed Reactor*) berbahan bakar jenis bola dapat menyelesaikan persamaan difusi neutron dalam satu, dua, atau tiga dimensi. Model difusi kartesian atau silinder dapat diselesaikan dengan baik. Program PEBBED6 dapat menghitung parameter neutronik, derajat bakar dan distribusi temperatur pada teras reaktor maupun reflektor dengan penyelesaian persamaan aliran fluida termal hanya dalam 2-dimensi geometri silinder (R-Z), sementara untuk geometri tiga dimensi masih dalam proses pengembangan.

Variasi temperatur dan derajat bakar pada teras reaktor jenis PBR ini sepadan dalam variasi tampang lintang serapan dan hamburan neutron yang ada. Untuk alasan ini, hasil yang akurat tidak dapat diperoleh tanpa mengetahui temperatur lokal material yang digunakan dalam struktur reaktor tersebut. PEBBED6 berisi modul konveksi yang didedikasikan khusus untuk menghitung temperatur pendingin helium dan bahan bakar bola pada saat kondisi mantap (*steady state*). Perhitungan distribusi temperatur pendingin helium

dan bahan bakar *pebble* dapat dilakukan secara cepat dengan cara penyelesaian persamaan satu dimensi yang mengasumsikan bahwa hanya aliran pendingin dari arah atas ke bawah teras (*downward flow*) yang diperhatikan, sementara aliran pendingin ke arah radial diabaikan. Sehingga untuk meningkatkan akurasi dan fleksibilitas, modul THERMIX-KONVEK yang digunakan dalam VSOP'94 telah diintegrasikan dalam program PEBBED6. Modul THERMIX-KONVEK menyelesaikan persamaan perpindahan panas dan dinamika gas dalam dua dimensi R-Z yang berisikan berbagai material dan korelasi perpindahan panas yang tepat untuk analisis reaktor jenis PBR. Pengembangan selanjutnya sedang dilakukan di Idaho National Laboratory (INL) untuk menggabungkan PEBBED dengan RELAP5, sebagai alternatif lain untuk THERMIX dan mensimulasikan perilaku sistem yang lebih luas lagi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi temperatur pada bahan bakar *pebble* di teras dan reflektor RDE, sehingga temperatur keluaran sesuai dengan yang diharapkan yaitu panas reaktor yang tinggi sehingga mampu digunakan untuk keperluan penelitian lainnya. Penelitian dimulai dari desain elemen bahan bakar berupa partikel berlapis TRISO dengan memperhitungkan heterogenitas ganda pada kernel partikel berlapis maupun pada bahan bakar bola di dalam teras reaktor, perhitungan integral resonansi tampang

lintang data nuklir, menghitung spektrum neutron, perhitungan secara difusi untuk geometri 2-dimensi (R-Z) dan penentuan parameter *thermal-flow* yang digunakan pada perhitungan reaktor temperatur tinggi^[11,12]. Simulasi *thermal-flow* pada kondisi tunak maupun tak tunak (transien) yang terjadi pada teras reaktor dan reflektor dapat diperhitungkan dengan modul THERMIX ini. Namun dalam penelitian ini akan dilakukan pada kondisi tunak (*steady state*) dengan memvariasikan tiga ketebalan reflektor pada teras RDE yaitu 100 cm, 150 cm dan 200 cm.

DESKRIPSI BAHAN BAKAR DAN TERAS

Ilustrasi bahan bakar reaktor RDE, mengikuti bentuk dan geometri bahan bakar HTR-10 yang berupa partikel berlapis TRISO dengan kernel uranium dioksida (UO_2) seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 dan Tabel 1.



Gambar 1. Ilustrasi bahan bakar yang digunakan pada reaktor RDE

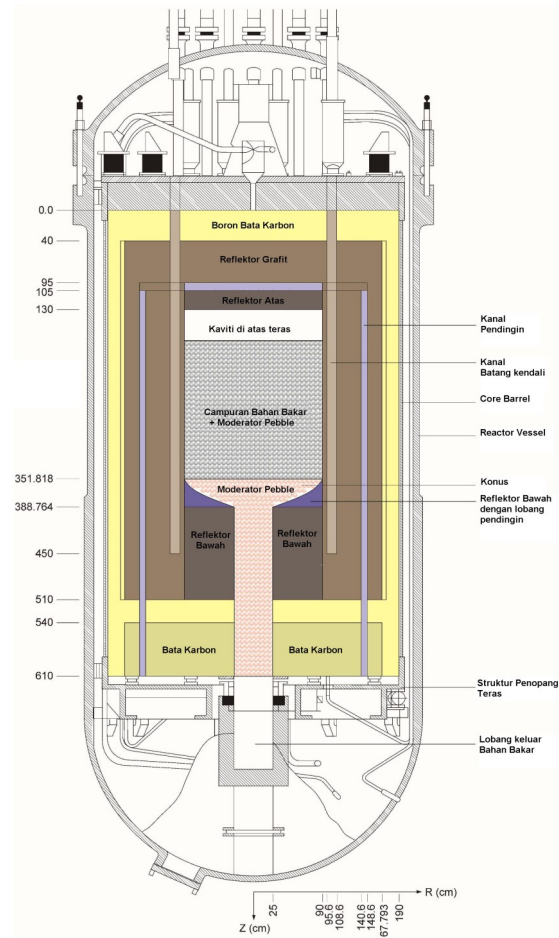
Tabel 1. Spesifikasi teknis bahan bakar TRISO dan *pebble* untuk teras RDE ^[1,13,14,15]

| | |
|--|---------------------------|
| Material kernel bahan bakar | UO ₂ |
| Diameter kernel, cm | 0,05 |
| Enrichment, % (U-235) | 17 |
| Densitas kernel, g/cm ³ | 10,4 |
| Muatan HM (<i>Heavy Metal</i>) per <i>pebble</i> , gram | 5,00 |
| Diameter total kernel + lapisan TRISO, cm | 0,091 |
| Material lapisan <i>coating</i> (dimulai dari kernel)) | C/iPyC/SiC/oPyC |
| Ketebalan lapisan <i>coating</i> , cm | 0,009/0,0040/0,0035/0,004 |
| Densitas lapisan <i>coating</i> , g/cm ³ | 1,05/1,90/1,38/1,90 |
| Diameter <i>pebble</i> , cm | 6,00 |
| Diameter daerah aktif bahan bakar, cm | 5,00 |
| Tebal matriks grafit <i>outer shell</i> , cm | 0,50 |
| Densitas matriks grafit <i>outer shell</i> , g/cm ³ | 1,75 |

Bentuk dan geometri teras RDE mengadopsi bentuk teras HTR-10 yang ada di Universitas Tsinghua, Cina seperti pada Gambar 2. Teras RDE berbentuk silinder dengan tinggi dan diameter aktif teras masing-masing adalah 197 cm dan 180 cm. Tinggi dan diameter total teras RDE masing-masing adalah 610 cm dan 380 cm.

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam penelitian dimulai dari menghitung komposisi dan densitas semua material penyusun bahan bakar kernel partikel TRISO, *pebble*, teras, pendingin helium dan reflektor. Pemodelan geometri bahan bakar kernel partikel berlapis TRISO dan bahan bakar *pebble* menggunakan

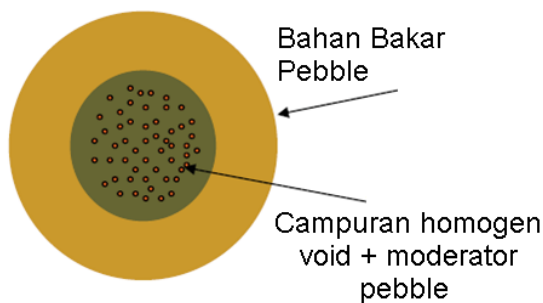
Gambar 2. Geometri teras HTR-10 yang diacu untuk RDE 10MWth ^[16]

program PEBBED6 dengan memanfaatkanampang lintang data nuklir ENDF/B-VII yang dibangkitkan secara simultan dari program COMBINE-7 untuk menghitung spektrum neutron teras reaktor dan perhitunganampang lintang yang digunakan dalam PEBBED6. Program COMBINE-7 menggunakan 167 kelompok energi neutron yang di *down-collapsing* atau disederhanakan menjadi 8 (delapan) kelompok energi neutron seperti ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Enam kelompok energi neutron yang digunakan pada program PEBBED6

| Kel. Energi | Rentang Energi (eV) | Keterangan |
|-------------|---|------------|
| 1. | $2,0 \times 10^7 - 1,832 \times 10^5$ | Cepat |
| 2. | $1,832 \times 10^5 - 7,102 \times 10^3$ | Cepat |
| 3. | $7,102 \times 10^3 - 2,035 \times 10^3$ | Cepat |
| 4. | $2,035 \times 10^3 - 2,382$ | Epitermal |
| 5. | $2,382 - 1,5$ | Termal |
| 6. | $1,5 - 4,2 \times 10^{-1}$ | Termal |
| 7. | $4,2 \times 10^{-1} - 1,2 \times 10^{-1}$ | Termal |
| 8. | $1,200 \times 10^{-1} - 0,0$ | Termal |

Sebuah model sel satuan pada program COMBINE-7 dikonstruksi untuk zona bahan bakar (*pebble-bed*) berisikan bahan bakar *pebble* tunggal yang dikelilingi oleh campuran homogen moderator grafit dan void seperti disajikan dalam Gambar 3. *Smearred number density* dihitung untuk sel satuan yang homogen. Opsi NIT (*Nordheim Integral Treatment*) dipilih untuk perhitungan tampang lintang resonansi.



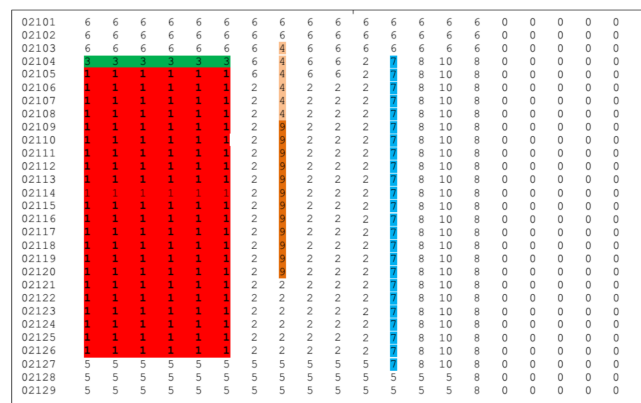
Gambar 3. Model Sel Satuan pada program COMBINE-7

Untuk perhitungan distribusi *thermal-flow*^[17] yaitu temperatur pada bahan bakar teras dan reflektor reaktor RDE, program PEBBED6 dapat dikombinasikan dengan modul THERMIX dari program legendaris

VSOP (*Very Sophisticated Old Program*) yang sudah digunakan pada reaktor HTGR di Jerman, PBMR Afrika Selatan hingga HTR-10 di Universitas Tsinghua Cina. Modul THERMIX dari program VSOP'94 berisikan program termal-hidrolika dua dimensi (R-Z) yang dikembangkan di *Kernforschungsanstalt* (KFA) Jülich GmbH Jerman yang menyelesaikan persamaan perpindahan panas pada media gas, cair dan padat menggunakan densitas daya yang dihasilkan dari program fisika reaktor.

PEMODELAN TERAS REAKTOR

Pemodelan teras dan reflektor RDE menggunakan program PEBBED6 disajikan dalam Gambar 4.



Keterangan:

- | | | | |
|---|---------------------|----|------------------------|
| 1 | : Bahan Bakar | 6 | : Reflektor Atas |
| 2 | : Reflektor Samping | 7 | : Kanal Helium |
| 3 | : Void | 8 | : Barrel |
| 4 | : Batang Kendali | 9 | : Kanal Batang Kendali |
| 5 | : Reflektor Bawah | 10 | : Gap |

Gambar 4. Pemodelan teras dan reflektor RDE menggunakan program PEBBED6.

HASIL DAN PEMBAHASAN

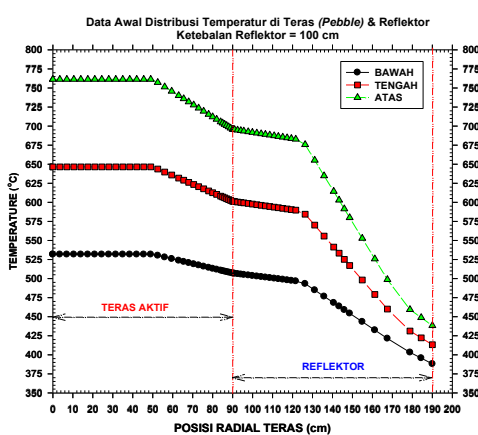
Semua data perhitungan distribusi temperatur pada teras (*pebble*) dan reflektor RDE dilakukan menggunakan program PEBBED6 yang telah diintegrasikan dengan modul THERMIX. Perhitungan distribusi temperatur

pada bahan bakar di teras dan reflektor RDE yang berbahan bakar *pebble* berisikan 8335 kernel TRISO UO_2 dengan pengkayaan 17 % digunakan dalam perhitungan yang melibatkan modul THERMIX dari VSOP'94. Perhitungan dilakukan untuk tiga ketebalan reflektor yang berbeda yaitu 100 cm, 150 cm dan 200 cm. Nilai kritikalitas teras RDE ditentukan untuk masing-masing kondisi ketebalan reflektor, dengan rasio komposisi bahan bakar terhadap moderator (F/M) 57/43 adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Nilai kritikalitas teras RDE untuk tiga ketebalan reflektor radial

| No. | Ketebalan Reflektor (cm) | Nilai Kritikalitas (k_{eff}) |
|-----|--------------------------|----------------------------------|
| 1. | 100 | 1,00219 |
| 2. | 150 | 1,00226 |
| 3. | 200 | 1,00230 |

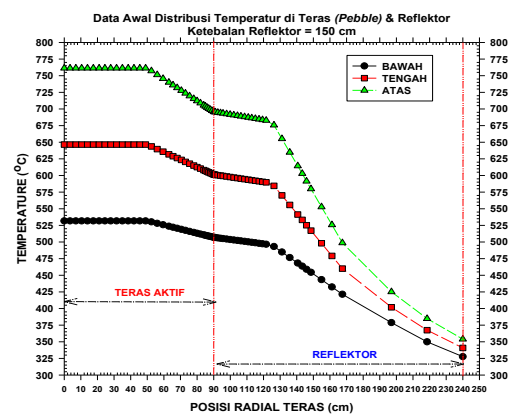
Dari Tabel 3, tampak bahwa perubahan nilai kritikalitas untuk ketebalan reflektor radial sangat kecil yaitu sekitar 0,218 %, 0,225 % dan 0,229 % (perubahan hanya pada digit ke 4 dan 5 saja).



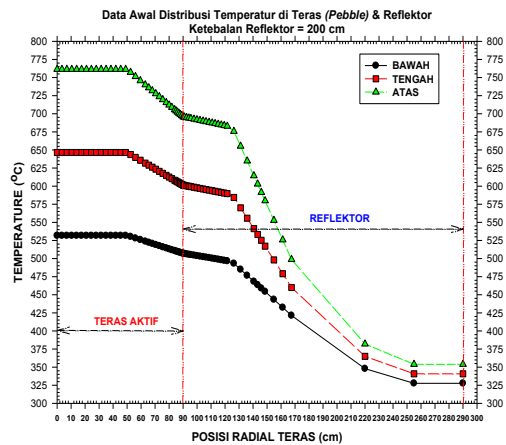
Gambar 6. Distribusi temperatur teras dan reflektor RDE 10 MWth dengan ketebalan reflektor 100 cm

Perhitungan distribusi temperatur *pebble* pada teras aktif dan reflektor RDE dilakukan untuk tiga variasi ketebalan reflektor radial yaitu 100, 150 dan 200 cm) menggunakan PEBBED6 yang terintegrasi dengan modul THERMIX dari VSOP'94. Perhitungan dilakukan pada bahan bakar teras bagian bawah, tengah dan atas, seperti disajikan dalam Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.

Tampak dalam Gambar 6, 7 dan 8 untuk ketebalan reflektor 100 cm, 150 cm dan 200 cm temperatur maksimum permukaan bahan bakar pada bagian tengah dan atas teras aktif (*pebble*) masing-masing adalah sekitar 646,50 °C dan 761,30 °C. Nilai temperatur ini tidak terpengaruh dengan adanya ketiga ketebalan reflektor yang berbeda. Temperatur maksimum bahan bakar di bagian tengah dan atas paling dekat dengan reflektor samping masing-masing adalah 601,40 °C dan 695,80 °C.



Gambar 7. Distribusi temperatur teras (*pebble*) dan reflektor RDE 10 MWth dengan ketebalan reflektor 150 cm



Gambar 8. Distribusi temperatur teras (*pebble*) dan reflektor RDE 10 MWth dengan ketebalan reflektor 200 cm

Temperatur pada ketebalan reflektor 100 cm pada bagian tengah dan atas reflektor sisi samping paling luar masing-masing adalah 413,20 °C dan 438,30 °C. Temperatur pada ketebalan reflektor 150 cm dan 200 cm pada bagian tengah dan atas sisi samping reflektor paling luar adalah sekitar 340,80 °C dan 353,90 °C.

Dari ketiga gambar tersebut terlihat bahwa pada ketebalan reflektor 150 cm dan 200 cm temperatur bagian terluar reflektor sudah tidak ada perubahan (stabil). Dari data referensi diperoleh informasi bahwa desain temperatur maksimum pada permukaan bahan bakar *pebble* adalah 927 °C^[5], reflektor samping paling luar 662 °C^[5], *core barrel* adalah 500°C^[1] dan pada bagian *reactor pressure vessel* adalah 350°C^[1]. Variasi model perhitungan dengan ketiga ketebalan reflektor tersebut memberikan nilai temperatur maksimum yang masih dalam rentang batas nilai persyaratan keselamatan. Dari hasil perhitungan dan analisis tersebut ketebalan reflektor RDE 100 cm sudah memenuhi persyaratan desain.

KESIMPULAN

Pemodelan mesh pada teras dan reflektor untuk reaktor RDE menggunakan PEBBED6 yang dikopel dengan THERMIX untuk ketebalan reflektor 100cm, 150 cm dan 200cm menghasilkan temperatur maksimum bahan bakar *pebble* pada teras di bagian tengah dan atas untuk ketiga ketebalan reflektor adalah 646,50 °C dan 761,3 °C. Sedangkan temperatur maksimum bahan bakar *pebble* pada teras bagian samping tengah dan atas (paling dekat dengan reflektor) samping masing-masing adalah 601,40 °C dan 695,80 °C. Sementara temperatur maksimum pada bagian tengah dan atas reflektor sisi samping bagian terluar untuk ketebalan 100 cm masing-masing adalah 413,20 °C dan 438,30 °C yang lebih tinggi dibanding temperatur dengan ketebalan reflektor 150 cm dan 200 cm yang hanya 340,80 °C dan 353,90 °C. Dengan demikian model perhitungan dengan ketiga ketebalan reflektor tersebut memberikan distribusi nilai temperatur yang masih dalam rentang nilai desain keselamatan temperatur yang dipersyaratkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Jupiter Sitorus Pane, M.Sc. selaku Kepala Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor (BFTR) - PTKRN dan Ir. Tagor Malem Sembiring selaku koordinator penelitian yang telah banyak memberikan saran, bimbingan dan perbaikan untuk kesempurnaan makalah ini. Penelitian ini sepenuhnya dibiayai oleh DIPA PTKRN 2016.

DAFTAR PUSTAKA

1. RENUKO, “Final Report – Safety Analisis Report (SAR), Chapter 3.2 Reactor Core”, RENUKO, RDE/DS-WBS06-605, Rev. No. 02, 04 December 2015.
2. PUSAT TEKNOLOGI DAN KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR (PTKRN) - BATAN, “Dokumen Spesifikasi Teknis Reaktor Daya Eksperimental”, Nomor Identifikasi Dokumen: DT.002.KRN.2014, Rev.0, 2014.
3. PUSAT TEKNOLOGI DAN KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR (PTKRN) - BATAN, “Dokumen User Requirement Document Reaktor Daya Eksperimental”, Nomor Identifikasi Dokumen: DT.003.KRN.2014, Rev.0, 2014.
4. MENG-JEN WANG et al., “Criticality calculations of the HTR-10 pebble-bed reactor with SCALE6/CSAS6 and MCNP5”, *Annals of Nuclear Energy* 64, 1–7, 2014.
5. FUBING CHEN et al, “Benchmark Calculation for the Steady-State Temperature Distribution of the HTR-10 under Full-Power Operation”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 46, No. 6, p. 572–580, 2009.
6. J. ROSALES et al, “Computational Model for the Neutronic Simulation of Pebble Bed Reactor’s Core Using MCNPX”, *Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Nuclear Energy*, Volume 2014, Article ID 279073, 12 pages, 2014
7. KANIA, M. J., NABIELEK, H. AND NICKEL, H., “Coated Particle Fuels for High-Temperature Reactors”, *Materials Science and Technology*, DOI: 10.1002/9783527603978.mst0449, p.1–183, 2015.
8. HANS D. GOUGAR et al, “Automated Design and Optimization of Pebble-Bed Reactor Cores”, *Journal of Nuclear Science and Engineering* 165, 245–269, 2010.
9. HANS D. GOUGAR, “The Application of the PEBBED Code Suite to the PBMR-400 Coupled Code Benchmark – FY 2006 Annual Report”, INL/EXT-06-11842, September 2006.
10. GERHARD STRYDOM, “PEBBED Uncertainty and Sensitivity Analysis of the CRP-5 PBMR DLOFC Transient Benchmark with the SUSAN Code”, INL/EXT-10-20531, January 2011.
11. B. BOER, A.M. OUGOUAG, “Final Report on Utilization of TRU TRISO Fuel as Applied to HTR Systems, Part I: Pebble Bed Reactors”, NL/EXT-11-21436, March 2011.
12. FREDERIK REITSMA, “The Pebble Bed Modular Reactor Layout and Neutronics Design of the Equilibrium Cycle”, *PHYSOR-2004*, Chicago, Illinois, April 25-29, 2004.

13. ZUHAIR, SUWOTO, PUTRANTO ILHAM YAZID, JUPITER S. PANE, “Studi Model Benchmark MCNP6 Dalam Perhitungan Reaktivitas Batang Kendali HTR-10”, *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*, p-ISSN: 1410-6957, e-ISSN: 2503-5029, Vol. 9, No. 2, p:95-103, Juli 2016.
14. VOLKAN, SEKER, ÜNER ÇOLAK, “HTR-10 full core first criticality analysis with MCNP”, *Nuclear Engineering and Design* 222, 263–270, 2003.
15. WILLIAM K. TERRY et al, “Evaluation of the HTR-10 Reactor as a Benchmark for Physics Code QA”, *ANS Topical Meeting on Reactor Physics, PHYSOR*, 2006.
16. WILLIAM K. TERRY (Evaluator) et al, “Evaluation of the Initial Critical Configuration of the HTR-10 Pebble-Bed Reactor”, HTR10-GCR-RESR-001, *CRIT-REAC*, NEA/NSC/DOC (2006)1.
17. HANS D. GOUGAR, “The Application of the PEBBED Code Suite to the PBMR -400 Coupled”, *Code Benchmark – FY 2006 Annual Report*, INL/EXT-06-11842, September 2006.