

ANALISIS KRITIKALITAS TINGGI TERAS AKTIF HTGR-10MWth DENGAN VARIASI PENGAYAAN PADA KERNEL URANIUM OKSIDA

Hery Adrial

Pusat Teknologi dan Keselamatan Nuklir - BATAN
Kawasan Puspiptek, Gedung No. 80, Serpong, Tangerang Selatan 15313

ABSTRAK

ANALISIS KRITIKALITAS TINGGI TERAS AKTIF HTGR-10MWth DENGAN VARIASI PENGAYAAN PADA KERNEL URANIUM OKSIDA. HTGR-10MWth merupakan salah satu bentuk dari reaktor HTGR tipe *pebble bed*. Reaktor jenis ini memiliki reaktivitas negatif sebagai fungsi keselamatan melekatnya. Dalam fisika reaktor, parameter kritikalitas merupakan faktor penting untuk mengetahui kondisi kekritisan reaktor, yang menjadi penentu apakah reaktor dapat beroperasi atau tidak. Kritikalitas pada teras aktif suatu reaktor sangat dipengaruhi oleh ketinggian teras aktif, tingkat pengayaan bahan bakar, geometri teras reaktor dan parameter lainnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan parameter neutronik yang sesuai agar reaktor dapat beroperasi secara optimal. Metodologi yang dilakukan adalah dengan melakukan pemodelan kernel berlapis TRISO dengan model berbentuk kisi-kisi SC (*simple cubic*), dan pemodelan geometri reaktor. Bahan bakar dan moderator *pebble* pada teras reaktor dimodelkan dalam bentuk kisi BCC (*body-centered cubic*) dengan rasio perbandingan *pebble* bahan bakar dan *pebble* moderator sebesar 57:43. Paket program MCNP6 digunakan dalam analisis ini. Dari hasil perhitungan, didapat bahwa tinggi teras aktif kritis awal untuk pengayaan 17 % adalah 125 cm, pengayaan 14 % setinggi 141 cm, pengayaan 12 % adalah 161 cm dan pengayaan 10 % adalah 196,1 cm. Sementara, tinggi teras aktif penuh untuk pengayaan 8 % melebihi batas tinggi teras yang tersedia.

Kata kunci: HTGR 10MWth, kritikalitas, MCNP6, tinggi teras aktif, pengayaan.

ABSTRACT

ANALYSIS OF CRITICALITY FOR ACTIVE CORE HEIGHT OF HTGR-10 MWth WITH ENRICHMENT VARIATION OF KERNEL URANIUM OXIDE. HTGR-10 MWth is one type of HTGRs *pebble bed* reactor. This type of reactors have negative reactivity for their inherent safety functions. In addition, criticality parameters are important factors to find out that a nuclear reactor is in a critical condition so that the reactor can operate. Criticality on the active core of a reactor is strongly influenced by the active core height, the level of fuel enrichment and the reactor core geometry, and othersc. The goal of this research is to obtain the necessary neutron parameters so that the reactor can operate optimally. The methodology used begins with modelling the TRISO-coated kernels with a SC lattice (*simple Cubic lattice*), followed by reactor geometry modeling. The fuel and *pebble* moderators on the reactor core were modeled in the lattice of Body Centered Cubic (BCC) with the ratio of fuel *pebble* and moderator of 57:43. The program package used in the calculation is the MCNP6 code. From the calculation results, it is obtained that the initial active core height for enrichment of 17 % is 125 cm, for enrichment 14 % as high as 141 cm, for enrichment 12 % is 161 cm and for enrichment 10 % is 196.1 cm, while for enrichment 8% the core height is beyond the available limit.

Keywords: HTGR 10 MWth , criticality, MCNP6, active core height, enrichment

PENDAHULUAN

HTGR *pebble bed* merupakan reaktor Generasi IV berpendingin gas yang paling menjanjikan dan populer perkembangannya dalam dekade terakhir ini. Hal tersebut karena HTGR *pebble bed* memiliki sistem keselamatan melekat, reaktivitas temperatur negatif, efisiensi termal lebih baik serta temperatur keluaran yang tinggi. Aspek terakhir membuat HTGR dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi industri, seperti pembangkitan hidrogen, desalinasi, *enhanced oil recovery* serta aplikasi industri lainnya yang membutuhkan panas tinggi [1]. Dengan demikian, energi keluaran yang dibangkitkan HTGR *pebble bed* dapat berfungsi sebagai sumber energi panas untuk proses industri.

HTGR pertama kali dikembangkan pada tahun 1944 di Oak Ridge, Amerika Serikat. Selanjutnya, beberapa negara turut mengembangkan proyek HTGR, diantaranya Inggris dalam rentang tahun 1964-1974 dengan proyek Dragon, Jerman antara tahun 1967-1988 dengan proyek AVR (*Arbeitsgemeinschaft Versuchs Reaktor*) serta proyek THTR (*Thorium High Temperature Reactor*) pada tahun 1986-1989. Sementara, Amerika Serikat sendiri turut berperan dengan proyek Peach Bottom (1967-1974) dan proyek demonstrasi teknologi HTGR di Fort St.

Vrain dalam kurun tahun 1976-1989 [2-4]. Dewasa ini, ada beberapa proyek HTGR yang sedang dalam taraf perencanaan maupun konstruksi, yaitu PBMR Afrika Selatan, HTR-PM Cina, GTHTR300C Jepang, GT-MHR Rusia, ANTARES Perancis, NHDD Korea Selatan dan NGNP Amerika Serikat [5-8].

HTGR dapat dibagi menjadi 2 jenis, yakni tipe prismatik dan tipe *pebble bed*. Tipe prismatik banyak dikembangkan di Amerika Serikat dan Jepang, sedangkan *pebble bed* dikembangkan di Jerman, Rusia, Swiss, Afrika Selatan dan Cina. HTGR prismatik yang masih beroperasi adalah HTTR (*high temperature engineering test reactor*) yang digunakan sebagai fasilitas uji di Jepang, sedangkan untuk tipe *pebble bed* adalah HTR-10 yang difungsikan sebagai reaktor eksperimen di Cina.

HTGR-10MWth merupakan desain HTGR *pebble bed* yang mengacu pada HTR-10. Reaktor ini didesain menggunakan bahan bakar dan moderator berbentuk *pebble* (bola). Untuk mendukung sistem keselamatan pasif dan melekat, konstruksi HTGR-10MWth sangat didominasi oleh grafit. Pada HTGR, grafit digunakan sebagai material struktur, reflektor neutron dan moderator karena grafit mempunyai sifat mekanik yang baik dalam kondisi radiasi yang tinggi [9,10].

Dalam fisika reaktor nuklir, faktor multiplikasi merupakan parameter penting untuk mengetahui kondisi kekritisitas suatu reaktor. Nilai faktor multiplikasi sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, diantaranya ketinggian teras aktif, tingkat pengayaan bahan bakar maupun geometri teras. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis kritikalitas tinggi aktif teras HTGR-10MWth dengan variasi pengayaan pada kernel uranium oksida. Asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Daya 10MWth;
2. Tinggi teras yang dianalisis mulai dari 80 cm hingga 197 cm;
3. Kernel bahan bakar terbuat dari UO_2 dengan densitas 10,4 g/cc;
4. Rasio bahan bakar terhadap moderator (f:m) sebesar 57:43;
5. Perubahan temperatur operasi dilakukan pada 300 °C, 600 °C, 900 °C dan 1200 °C.

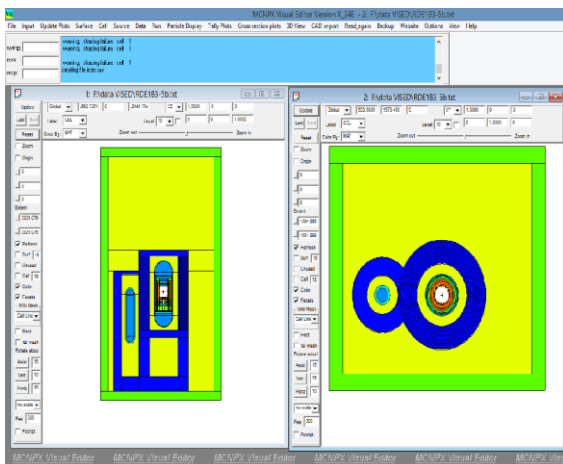
Paket program yang digunakan untuk simulasi adalah MCNP6. Hasil analisis digunakan untuk mendapatkan parameter neutronik yang diperlukan agar reaktor dapat beroperasi secara optimal. MCNP6 merupakan versi terbaru dari MCNP, yang merupakan perangkat lunak yang dapat mensimulasikan interaksi partikel dalam reaktor nuklir dengan metode Monte Carlo. MCNP6 memanfaatkan pustaka data tampang

lintang nuklir energi kontinu ENDF/B-VII. Pada penelitian ini, bahan bakar dan moderator *pebble* dalam teras reaktor dimodelkan dalam kisi BCC (*body-centered cubic*), sementara kernel UO_2 berlapis TRISO (*TRistructural-ISotropic*) yang tersebar di dalam *pebble* dimodelkan dalam bentuk kisi SC (*simple cubic*) [11-15].

DESKRIPSI HTGR-10MWth PEBBLE BED

HTGR-10MWth *pebble bed* merupakan reaktor nuklir temperatur tinggi berpendingin gas. HTGR-10MWth *pebble bed* didesain memiliki temperatur masuk sebesar 250 °C dan temperatur keluar sebesar 750 °C dengan tekanan operasional 3 MPa. Media pendingin yang digunakan adalah helium yang bersifat tidak korosif dan transparan terhadap neutron. HTGR-10MWth mempunyai teras aktif setinggi 197 cm dengan radius sebesar 90 cm. Pada bagian bawah teras terdapat corong setinggi 36 cm, dengan radius atas sebesar 90 cm dan radius bawah sebesar 25 cm. Pada awal pengoperasian, corong tersebut diisi oleh *pebble* moderator. Teras dikelilingi grafit reflektor, bejana bertekanan *stainless steel* dengan ketebalan 8 cm, RCCS (*reactor cavity cooling system*) serta pengungkung beton. Pada bagian blok reflektor terdapat 10 lubang saluran batang kendali dengan diameter

masing-masing 6,5 cm, 7 lubang saluran bola *absorber* kecil berbentuk kapsul, 3 lubang saluran iradiasi berdiameter 6,5 cm serta 20 lubang saluran pendingin berdiameter 4 cm [16-19]. Dari sisi aksial, di atas teras aktif terdapat ruang hampa setebal 41 cm dan reflektor atas setebal 16 cm. Sementara, bagian bawah teras aktif diselubungi dengan blok grafit. Bersebelahan dengan sistem teras reaktor terdapat sistem perpindahan panas. Visualisasi teras HTGR-10MWth *pebble bed* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Visualisasi HTGR10MWth menggunakan paket program VISED

Bahan bakar HTGR-10MWth *pebble bed* berbentuk *pebble* (bola) grafit berdiameter 6 cm yang di dalamnya terdapat zona bahan bakar berisi 8335 kernel UO_2 berlapis partikel TRISO [20]. Densitas kernel UO_2 yang digunakan sebesar $10,4 \text{ g/cm}^3$ dengan radius 0,025 cm.

TRISO merupakan lapisan pembungkus kernel UO_2 yang terdiri dari 4 lapisan [20-23], yaitu lapisan penyangga karbon berpori (*porous carbon buffer*) dengan ketebalan 0,009 cm, berfungsi untuk menampung gas-gas hasil produk fisi yang berasal dari kernel serta mengantisipasi terjadinya *swelling* pada kernel bahan bakar. Lapisan kedua merupakan lapisan piro karbon bagian dalam (*inner pyrolytic carbon, IPyC*) dengan ketebalan 0,004 cm, berguna sebagai lapisan penahan difusi produk fisi dan untuk mencegah berinteraksinya CO dengan SiC.

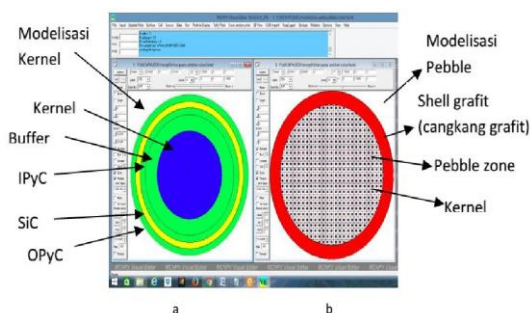
Lapisan ketiga adalah lapisan silikon karbida (SiC) dengan ketebalan 0,0035 cm, berfungsi menjadi penahan primer terhadap produk fisi baik berupa gas maupun padatan pada temperatur dibawah $1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Lapisan terakhir adalah lapisan piro karbon bagian luar (*outer pyrolytic carbon, OPyC*) dengan ketebalan 0,004 cm. Lapisan ini menjadi lapisan terakhir yang menahan keluarnya produk fisi dengan fasa gas dan merupakan lapisan yang berikatan dengan elemen matriks bahan bakar [24]. Kernel-kernel berlapis TRISO tersebut terdispersi dalam matrik grafit yang berada pada zona bahan bakar. Visualisasi *pebble* bahan bakar dan moderator dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Visualisasi *pebble* bahan bakar dan moderator [25]

METODOLOGI

Penelitian ini diawali dengan melakukan pemodelan kernel berlapis TRISO. Selanjutnya, dilakukan pemodelan kisi partikel bahan bakar TRISO yang berada pada zona bahan bakar *pebble*. Model kisi berbentuk SC dengan *pitch* sebesar 0,198762 cm dan fraksi *packing* TRISO sebesar 5,024811 %. Kemudian, dilakukan pemodelan *pebble* bahan bakar yang terdiri dari daerah cangkang grafit dengan ketebalan 0,5 cm dan densitas 1,75 g/cm³, serta zona bahan bakar berdiameter 5 cm dan berisi 8335 butir partikel TRISO. Visualisasi bentuk bahan bakar *pebble* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Visualisasi modelisasi *pebble* bahan bakar HTGR 10MWth dengan MCNP6

Langkah berikutnya, dilakukan pemodelan *pebble* bahan bakar dan moderator di dalam teras dengan *packing factor* 57 : 43. Model dibuat dalam bentuk kisi BCC. Pada model ini, satu *pebble* bahan bakar ditempatkan pada pusat kisi sedangkan 1/8 *pebble* moderator berada pada pojok-pojok kisi.

Dengan demikian, dalam satu kisi terdapat 2 *pebble* yang terdiri dari 1 *pebble* bahan bakar dan 1 *pebble* moderator. Rasio bahan bakar terhadap moderator (F/M) akan mempengaruhi radius masing-masing *pebble* dan panjang *pitch* pada model kisi BCC. Untuk rasio F/M = 57 : 43 panjang *pitch* yang digunakan adalah 6.877 cm dan fraksi *packing pebble* sebesar 61 %. Pada kisi-kisi juga dimodelkan pendingin helium yang mengisi ruang antara *pebble* bahan bakar dan *pebble* moderator. Visualisasi model *pebble* bahan bakar, moderator dan pendingin helium disajikan pada Gambar 4.



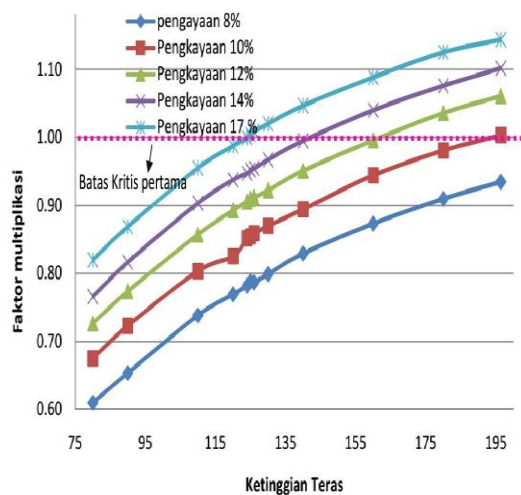
Gambar 4. Visualisasi dan pemodelan kisi BCC [26]

Terakhir, dilakukan perhitungan kritikalitas dalam berbagai ketinggian teras dan variasi pengayaan, yang dilanjutkan dengan perhitungan perubahan reaktivitas

terhadap perubahan temperatur operasi reaktor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan perhitungan kritikalitas pada berbagai ketinggian teras dan tingkat pengayaan menggunakan MCNP6, didapatkan hasil sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Nilai kritikalitas terhadap ketinggian teras untuk beberapa tingkat pengayaan.

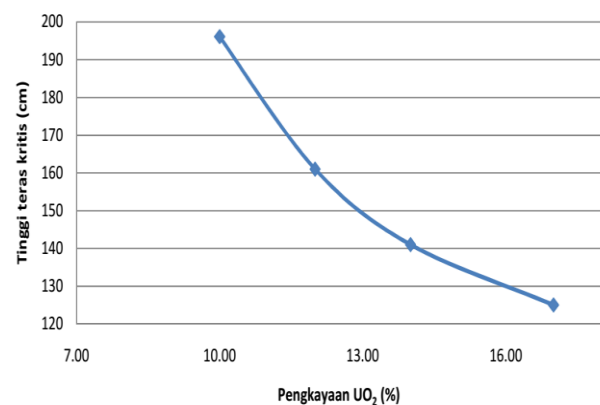
Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa ketinggian teras kritis pada kondisi awal semakin bertambah seiring dengan berkurangnya tingkat pengayaan bahan bakar. Dengan tingkat pengayaan bahan bakar 17%, tinggi teras kritis pertama dicapai pada tinggi 125 cm. Dalam penelitian-penelitian lain pada reaktor HTR-10 Cina dengan pengayaan bahan bakar serupa didapatkan hasil ketinggian teras kritis pertama yang relatif mendekati, yaitu 123,06 cm [27], 123,57 cm dengan

menggunakan paket VSOP oleh Jing et al. [28] dan 130,15 cm dengan MCNP pada penelitian di KAIST [29].

Hasil perhitungan untuk hubungan pengayaan bahan bakar terhadap tinggi teras kritis pertama secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 1 dan diperjelas pada Gambar 6.

Tabel 1. Hubungan pengayaan bahan bakar terhadap tinggi teras kritis pertama

No	Pengkayaan UO ₂ (%)	Tinggi Teras kritis pertama (cm)
1	17.00	125
2	14.00	141
3	12.00	161
4	10.00	196.1
5	8.00	Diluar teras tersedia

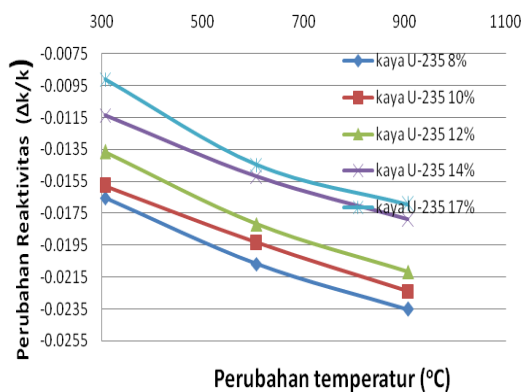


Gambar 6. Kurva hubungan pengayaan bahan bakar terhadap tinggi teras pertama

Mengacu pada Tabel 1 maupun Gambar 6, terlihat bahwa semakin rendah tingkat pengayaan bahan bakar, maka dibutuhkan teras yang lebih tinggi untuk mencapai teras kritis pertama. Pada pengayaan bahan bakar 8% ketinggian

teras yang dibutuhkan melampaui batasan teras reaktor, yakni 197 cm. Kondisi ini terjadi karena, semakin tinggi tingkat pengayaan bahan bakar, semakin banyak pula bahan fisil di dalam teras. Efeknya, reaksi fisi yang terjadi pada teras reaktor akan semakin banyak. Dengan demikian, pada kondisi pengayaan tinggi, hanya dibutuhkan ketinggian teras rendah untuk mendapatkan teras kritis pertama.

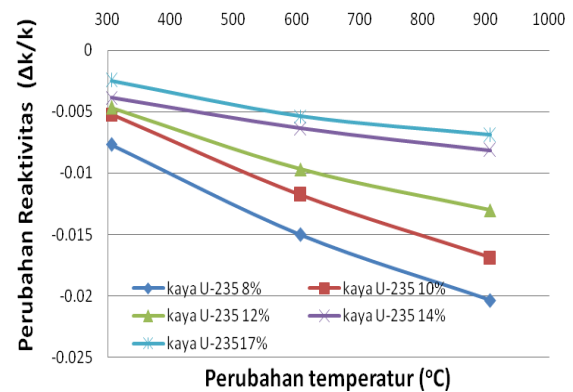
Pada penelitian ini juga dilakukan perhitungan perubahan reaktivitas terhadap perubahan temperatur teras untuk teras dengan ketinggian paling rendah dan teras penuh pertama. Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Hubungan perubahan reaktivitas terhadap perubahan temperatur pada ketinggian teras aktif 80 cm

Dari Gambar 7 terlihat bahwa semakin rendah pengayaan maka semakin kecil pula nilai reaktivitas negatifnya. Seiring dengan bertambahnya perbedaan temperatur, nilai reaktivitas negatif pun semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa

kenaikan temperatur reaktor berbanding lurus terhadap peningkatan absorpsi neutron dalam teras. Dengan demikian, reaktor semakin tanggap untuk menuju subkritis.



Gambar 8. Hubungan perubahan reaktivitas terhadap perubahan temperatur pada ketinggian teras aktif 197 cm

Gambar 8 menunjukkan perubahan reaktivitas untuk kondisi teras penuh pertama. Terlihat bahwa beda temperatur 300 °C menghasilkan nilai reaktivitas negatif sangat kecil. Artinya, pada perbedaan temperatur 300 °C, tanggapan reaktor untuk menuju subkritis sangat kecil. Dengan kata lain, sulit untuk membuat reaktor subkritis.

KESIMPULAN

Pada HTGR-10MWth dengan tinggi teras maksimal 197 cm, teras kritis pertama efektif dapat dicapai pada tingkat pengayaan UO_2 dari 10 % hingga 17 %. Pengayaan dibawah 10 % tidak mampu mencapai teras kritis pada batasan yang

tersedia. Pada tingkat pengayaan 17%, tinggi teras kritis pertama adalah setinggi 125 cm. Semakin tinggi pengayaan kernel UO_2 semakin rendah ketinggian teras kritis pertama yang dicapai. Pada kondisi teras penuh, semakin tinggi beda temperatur maka semakin besar nilai perubahan reaktivitas negatif, yang berarti semakin mudah untuk membuat teras menjadi subkritis. Sedangkan untuk ketinggian teras aktif yang paling rendah (tinggi teras aktif 80 cm), maka nilai perubahan reaktivitas negatif lebih tinggi dibandingkan kondisi teras penuh. Untuk semua kondisi ketinggian teras, HTGR 10MWth selalu mempunyai reaktivitas negatif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Syaiful Bakhri sebagai Manajer Program INSINAS-Flagship dan Dr. Geni Rina Sunaryo, M.Sc. sebagai Kepala Program INSINAS-Unggulan dan Kepala Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) – BATAN atas saran dan perbaikannya. Demikian pula kepada Ir. Zuhair, M.Eng, yang telah menyediakan waktu untuk berdiskusi tentang materi penulisan ini. Makalah ini didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia melalui INSINAS-Flagship Grant Program TA 2018.

DAFTAR PUSTAKA

1. J. ROSALES, *et al.*, “Computational Model for the Neutronic Simulation of Pebble Bed Reactor’s Core Using MCNPX”, *International Journal of Nuclear Energy*, Volume 2014, Article ID 279073, DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/279073> (2014).
2. ANONYMOUS, “Plutonium in High Temperature Reactors”, DRAGON Project Report 899, 1974.
3. ANONYMOUS, “AVR - Experimental High-Temperature Reactor, 21 Years of Successful Operation for a Future Energy Technology”, Association of German Engineers (VDI) - The Society for Energy Technologies (Publ.), Duesseldorf, June 1990.
4. ANONYMOUS, “HTR-GmbH: THTR-300 MW Kernkraftwerk Hamm-Uentrop”, *Kurzbeschreibung*, December 1983.
5. ANONYMOUS, “Reactor Safety Analysis Report of the South-African Pebble bed Modular Reactor (PBMR)”, Rev. E, PBMR Ltd., Centurion, South-Africa, 2000.
6. KAZUHIKO KUNITOMI, XING YAN, SHUSAKU SHIOZAWA, NOZIOMU FUJIMOTO, “GTHTR 300C for Hydrogen Cogeneration”, *The 2-nd International Topical*

- Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR-2004), Beijing, Cina, September 22-24, 2004.
7. JEAN-CLAUDE HAUTHIER, GERD BRINKMANN, BERNIE COPSEY, MICHEL LECOMTE, "ANTARES: The HTR/VHTR Project at Framatome ANP", The 2-nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR-2004), Beijing, Cina, September 22-24, 2004.
 8. ANONYMOUS, "Next Generation Nuclear Plant - Design Methods Development and Validation Research and Development Program Plan", Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL/EXT-04-02293 Rev. 0, September 2004.
 9. ZHEN Hu, *et al*, "CO₂ corrosion of IG-110 nuclear graphite studied by gas chromatography", *Journal of Nuclear Science and Technology* 51 (487-492) 4, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2013.877407>.
 10. XUEGANG LIU, *et al*, "Source Term Analysis of the Irradiated Graphite in the Core of HTR-10", *Science and Technology of Nuclear Installations Volume 2017*, Article ID 2614890, 6 pages DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2614890>.
 11. SUWOTO, ZUHAIR, "Analisis Laju Dosis Neutron Teras RGTT200K dengan MCNP", *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia* 17(107-121) 2, 2016 DOI: <http://dx.doi.org/10.17146/jstni.2016.17.2.2350>.
 12. ZUHAIR, SUWOTO, T. SETIADIPURA, Z. SU'UD, "The Effects of Applying Silicon Carbide Coating on Core Reactivity of Pebble bed HTR in Water Ingress Accident", *Kerntechnik* 82(92-97) 1, 2017 DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110628>.
 13. SUWOTO, ZUHAIR, "Analisis Sensitivitas Ketebalan Reflektor Grafit Teras RGTT200K menggunakan Perhitungan Monte Carlo", *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* 16 (73-83) 2, 2014.
 14. ZUHAIR, SUWOTO, P. SUPRIATNA, "Studi Efek Fraksi Packing Triso dalam Desain Kritikalitas RGTT200K", *Seminar Nasional ke-17 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir*, Yogyakarta, 2011.
 15. ZUHAIR, SUWOTO, "Analisis Efek Kecelakaan Water Ingress terhadap Reaktivitas Doppler Teras RGTT200K", *Jurnal Teknologi*

- Reaktor Nuklir TRI DASA MEGA, 17(31-40) 1, 2015.
16. HERY ADRIAL, ZUHAIR, SUWOTO, SYAIFUL BAKHRI, GENI RINA SUNARYO, "Effect of F/M Ratio Against Neutron Flux Distribution on the HTGR-10MWth Pebble Bed Core", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir, Makassar, 12 Oktober 2017.
 17. SUWOTO, H. ADRIAL, A. HAMZAH, ZUHAIR, S. BAKHRI, G.R. SUNARYO, "Neutron Dose Rate Analysis on HTGR-10 Reactor using Monte Carlo Code, Journal of Physics: Conference Series 962 (1), 012029, 2018.
 18. ZUHAIR, SUWOTO, PIPING SUPRIATNA, "Studi Model Heksagonal MCNP5 dalam Perhitungan Benchmark Fisika Teras HTR-10", Jurnal Matematika & Sains, 17(61-70) 2, 2012.
 19. ZUHAIR, P.I. YAZID, J.S. PANE, "Studi Model Benchmark MCNP6 Dalam Perhitungan Reaktivitas Batang Kendali HTR-10", GANENDRA Majalah IPTEK Nuklir 19(95-103) 2, 2016 DOI: <http://dx.doi.org/10.17146/gnd.2016.19.2.2880>.
 20. HERY ADRIAL, SUWOTO, ZUHAIR, "Analysis on Fuel Inventory of HTGR10MWth Pebble Bed Base on Burnup Levels Variation using MCNPX", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir, Batam 4-6 Agustus 2016.
 21. SUWOTO, HERY ADRIAL, ZUHAIR, "Analisis Kuat Sumber Neutron Dan Perhitungan Laju Dosis Neutron Teras pertama RDE", Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir 23(33-44) 1, 2017 DOI: <https://doi.org/10.17146/urania.2017.23.1.3119>.
 22. ZUHAIR, SUWOTO, PUTRANTO ILHAM YAZID, "Investigasi Parameter Bahan Bakar Pebble dalam Perhitungan Teras Thorium RGTT200K", Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, 14(65-78) 2, 2013.
 23. ZUHAIR, SUWOTO, T. SETIADIPURA, S. BAKHRI, G. R. SUNARYO, "Study on Characteristic of Temperature Coefficient of Reactivity for Plutonium Core of Pebbled Bed Reactor", Journal of Physics: Conference Series 962 (1), 012058, 2018.
 24. S. A. HOSSEINI, "Neutronic Analysis of a Gaseous Control System for the HTR-10 Reactor", Annals of Nuclear Energy, 45 (80-85), 2012.

25. https://inis.iaea.org/collection/NCLC ollectionStore/_Public/37/122/37122251.pdf.
26. HERY ADRIAL, “Efek Impuritas Boron pada Kernel Bahan Bakar HTGR Pebble Bed”, SIGMA EPSILON-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir, 21(1), 2017.
27. WILLIAM K. TERRY, *et al.*, “Evaluation of the HTR-10 Reactor as a Benchmark for Physics Code QA”, PHYSOR-2006, ANS Topical Meeting on Reactor Physics, September 2006.
28. HYEDONG JEONG, SOON HEUNG CHANG, “Estimation of the Fission Products, Actinides and Tritium of HTR-10”, Nuclear Engineering and Technology, 41 (5), 2009.
29. HONG-CHUL KIM, SONG HYUN KIM, JONG KYUNG KIM, “A New Strategy to Simulate a Random Geometry in a Pebble bed Core with the Monte Carlo Code MCNP”, Annals of Nuclear Energy 38 (1877-1883), 2011.