

Desain Inti Reaktor *Supercritical Water Reactor* (SCWR) Model Teras Silinder (r, z) dengan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang

Setiyaningsih^{(1)*}, Yanti Yulianti⁽¹⁾, Simon Sembiring⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Unila,

Jl. Soemantri Brodjonegoro 1, Bandar Lampung 35141

E-mail: Setiyaningsihaning98@gmail.com*, yanti.yuliyanti@unila.ac.id, simonsembiring2@gmail.com

Diterima (10 April 2019), Direvisi (05 Agustus 2019)

Abstract. The research of the supercritical water reactor (SCWR) core design of the cylindrical core model (r, z) using the SRAC program has been done. The SRAC basic code was PIJ and CITATION. PIJ was used to calculate the fuel level and CITATION was used to calculate the reactor core level. The calculation of the reactor core has been done on the 1/4 cylinder core (r, z) and the geometry of the fuel cell was the cylindrical cell. Reactor fuel material was thorium burned 40 GWd/t and 30 GWd/t. The neutron parameters in this research were fuel enrichment, burn up, reactor core size, reactor core configurations, multiplication factor, and power density distribution. Multiplication factor (k -effective) in this research was 1.000004, which is reactor was in a critical condition. The reactor core in critical condition had the size of radius (r) was 130 cm, height (z) was 270 cm and fuel enrichment of 2.8262%. The maximum power density was 130.0808 Watts/cm³ which was located at a radius of 25 cm and 135 cm high. The peak power factor in the radial direction was 1.6063 and the peak power factor in the axial direction was 1.3189.

Keywords: reactor core design, power density, SCWR, SRAC, thorium

Abstrak. Penelitian desain inti reaktor air superkritis (SCWR) model teras silinder (r, z) menggunakan program SRAC telah dilakukan. Kode dasar SRAC, yaitu PIJ dan CITATION. PIJ digunakan untuk perhitungan tingkat sel bahan bakar dan CITATION digunakan untuk perhitungan tingkat teras reaktor. Perhitungan teras reaktor dilakukan pada ¼ bagian teras silinder (r, z) dan geometri sel bahan bakar berupa sel silinder. Material bahan bakar, yaitu thorium dengan *burn up* 40 GWd/t dan 30 GWd/t. Parameter neutronik pada penelitian ini meliputi persentase pengayaan bahan bakar, *burn up*, ukuran teras reaktor, konfigurasi teras reaktor, faktor multiplikasi, dan distribusi rapat daya. Faktor multiplikasi (k -efektif) pada penelitian ini sebesar 1,000004, dimana reaktor berada dalam kondisi kritis. Teras reaktor berada dalam kondisi kritis pada ukuran radius (r) 130 cm, tinggi (z) 270 cm dan pengayaan bahan bakar 2,8262%. Rapat daya maksimal yang diperoleh sebesar 130,0808 Watt/cm³, terletak pada radius 25 cm dan tinggi 135 cm. Faktor puncak daya pada arah radial yaitu 1,6063 dan faktor puncak daya pada arah aksial yaitu 1,3189.

Kata kunci: desain inti reaktor, rapat daya, SCWR, SRAC, thorium

PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik di Indonesia cenderung meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk. Kebutuhan penduduk terhadap energi listrik tidak sebanding dengan sumber daya yang ada. Sumber daya yang

menghasilkan energi listrik semakin terbatas, sehingga membutuhkan energi alternatif yang lain. Salah satu sumber energi alternatif yang menghasilkan listrik adalah pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). PLTN merupakan pembangkit listrik yang aman, bersih, ramah lingkungan dan relatif ekonomis.

PLTN menggunakan reaktor nuklir untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu jenis reaktor nuklir, yaitu *supercritical water reactor* (SCWR). Reaktor SCWR dirancang hanya untuk memproduksi listrik [1]. SCWR merupakan jenis reaktor termal yang dipromosikan sebagai reaktor generasi IV karena sederhana dalam pembangunannya dan memiliki efisiensi termal yang tinggi [2].

Pada penelitian ini dilakukan desain inti reaktor SCWR menggunakan bahan bakar thorium hasil daur ulang. Penggunaan thorium daur ulang sebagai bahan bakar merupakan sebuah cara untuk memproduksi energi nuklir jangka panjang dengan limbah radioaktif aktivitas rendah [3]. Bahan bakar yang biasa digunakan pada reaktor nuklir ada 2 jenis, yaitu bahan bakar fisil dan bahan bakar fertil. Penelitian ini menggunakan ^{232}Th hasil daur ulang sebagai bahan bakar yang bersifat fertil. Meskipun ^{232}Th tidak bersifat fisil, namun tetap dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir karena ^{232}Th akan menyerap neutron lambat untuk menghasilkan ^{233}U yang merupakan bahan fisil [4].

Pada perancangan reaktor diperlukan analisis yang komprehensif, yaitu meliputi analisis neutronik, analisis termal, dan analisis keselamatan [5]. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan desain reaktor SCWR yang memenuhi kriteria keselamatan melalui analisis neutronik. Salah satu besaran penting dalam analisis neutronik adalah faktor multiplikasi (k -effektif) [6]. Nilai k -effektif adalah suatu faktor yang merepresentasikan besarnya jumlah neutron saat ini dalam reaktor per jumlah neutron sebelumnya dalam reaktor [7]. Nilai k -effektif menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi berantai di dalam teras reaktor, dimana keadaan stabil (kritis) dicapai jika nilai k -effektif = 1 [8]. Untuk memperoleh reaktor dengan keadaan kritis, maka dilakukan desain reaktor menggunakan program *system reactor atomic code* (SRAC) yang dikembangkan

oleh *japan atomic energy research institute* (JAERI) pada tahun 1978. Program ini dapat membantu dalam mendesain dan menganalisis reaktor, khususnya reaktor termal [9].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan melakukan perhitungan sel bahan bakar menggunakan modul PIJ. Hasil yang diperoleh dari proses PIJ nantinya akan digunakan untuk perhitungan teras reaktor pada modul CITATION [10]. Tahapan dalam perhitungan sel bahan bakar, yaitu menentukan fraksi volume untuk mengetahui persentase jumlah material penyusun sel bahan bakar. Kemudian menentukan pengayaan dan menghitung densitas atom bahan bakar. Densitas atom dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$N = \rho \frac{N_A}{M_r} \quad (1)$$

dimana, N = densitas atom (atom/cm³), ρ = Massa jenis (gr/cm³), N_A = bilangan avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ atom/mol), M_r = massa molekul (gr/mol) [11].

Selanjutnya melakukan perhitungan teras reaktor menggunakan modul CITATION. Modul CITATION merupakan salah satu kode dasar SRAC yang digunakan untuk pemodelan tingkat teras [12]. Sebelum melakukan perhitungan tingkat teras, terlebih dahulu melakukan perhitungan *burn up* untuk mengetahui karakteristik perubahan isotop dalam reaktor. *Burn up* merupakan total energi yang dilepas per unit massa bahan bakar sebagai hasil pembakaran bahan bakar.

Perhitungan tingkat teras dilakukan pada bagian $\frac{1}{4}$ teras reaktor dengan menentukan syarat batas pada setiap bagian teras. Kemudian menentukan ukuran teras reaktor dan mengubah-ubah konfigurasi teras reaktor untuk mendapatkan teras reaktor yang ideal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

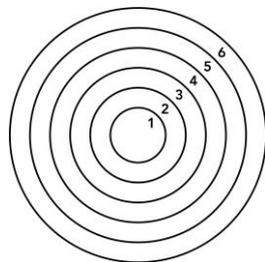
Pada perhitungan sel bahan bakar, modul PIJ digunakan sebagai langkah awal perancangan reaktor nuklir karena pemodelan tingkat sel diatur dalam modul PIJ [12]. Geometri sel bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Gambar 1 merupakan geometri sel bahan bakar berupa sel silinder (*cylindrical cell*) yang di definisikan sebagai IGT = 3 dalam program SRAC. Perhitungan sel bahan bakar menghasilkan tampang lintang makroskopik. Tampang lintang yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk menghitung distribusi fluks dan rapat daya pada teras reaktor.

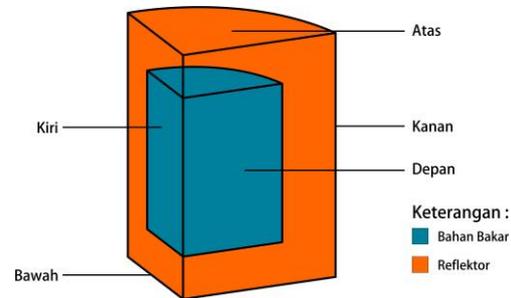
Perhitungan teras reaktor dilakukan menggunakan kode dasar CITATION. Pada modul CITATION teras reaktor dimodelkan dengan teras silinder (r,z). Teras reaktor diasumsikan hanya berisi bahan bakar dan reflektor, tanpa elemen batang kendali atau elemen lainnya [13]. Perhitungan teras reaktor dilakukan pada bagian ¼ teras reaktor dengan menentukan

syarat batas pada setiap bagian teras reaktor. Bagian ¼ teras reaktor ditunjukkan pada **Gambar 2**.

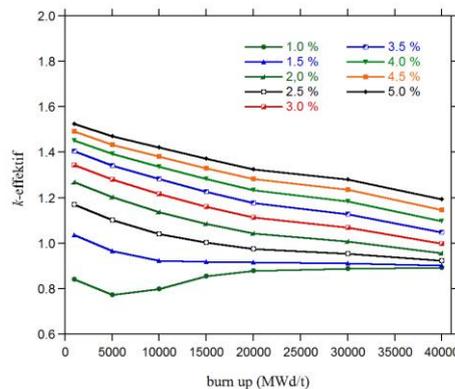
Sebelum melakukan perhitungan teras reaktor, terlebih dahulu melakukan perhitungan *burn up*. Perhitungan *burn up* merupakan perhitungan standar yang menitikberatkan pada manajemen bahan bakar, yaitu ukuran konsumsi bahan bakar, proses pembakaran, pengolahan serta banyaknya energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar yang dinyatakan dalam Mega Watt-hari (MWd) dari tiap ton bahan bakar [14]. Pada penelitian ini digunakan 7 step *burn up* dengan periode 1.000; 5.000; 15.000; 20.000; 30.000; 40.000 MWd/t. Keluaran yang dihasilkan pada modul ini disimpan dalam file MACRO. Kemudian keluaran tersebut digunakan sebagai masukan pada kode dasar CITATION. Setelah *running* program pada file *burn up*, maka diperoleh nilai *k*-efektif pada setiap periode *burn up* yang ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 1. Geometri sel bahan bakar (IGT = 3)



Gambar 2. Bagian ¼ teras reaktor.



Gambar 3. Nilai *k*-efektif pada tiap periode *burn up* dengan pengayaan 1-5 %.

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai k -effektif akan menurun seiring meningkatnya tingkat *burn-up* dan akan meningkat seiring dengan bertambahnya pengayaan bahan bakar. Hal ini disebabkan karena semakin besar tingkat *burn-up* maka akan berkurang jumlah atom dari bahan bakar. Semakin sedikit jumlah atom yang terkandung dalam bahan bakar, menyebabkan laju reaksi pembelahan semakin kecil sehingga neutron yang dihasilkan juga akan berkurang [15].

Untuk memperoleh reaktor dengan kondisi kritis (k -effektif = 1), maka konfigurasi bahan bakar dalam teras reaktor perlu diubah-ubah hingga mencapai kondisi kritis. Konfigurasi bahan bakar pada kondisi kritis ditunjukkan pada **Gambar 4**.

Gambar 4 menunjukkan konfigurasi teras reaktor dimana bahan bakar pertama (30 GWd/t) sebagai *outer fuel*, bahan bakar kedua (40 GWd/t) sebagai *inner fuel* dan reflektor melapisi seluruh bagian bahan bakar. Bentuk teras reaktor yang silinder memungkinkan neutron yang menumbuk reflektor akan dipantulkan kembali ke tengah teras reaktor. Sehingga kemungkinan terbesar terjadinya reaksi fisi berantai berada di tengah teras reaktor.

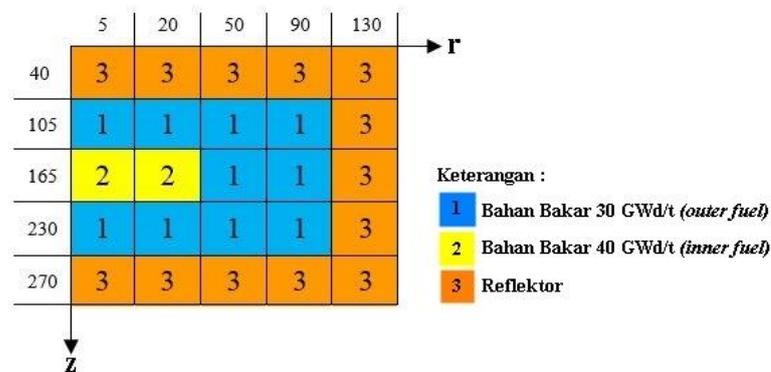
Pada desain teras reaktor, analisis neutronik yang perlu diperhatikan selain

nilai k -effektif adalah rapat daya (*power density*). Rapat daya adalah besarnya daya yang dihasilkan per satuan volume. Pada teknologi nuklir, pertimbangan pertama yang diutamakan adalah aspek keselamatan. Aspek tersebut diwakili oleh nilai faktor puncak daya yang didefinisikan tidak lebih dari 2,0 (<2) [16].

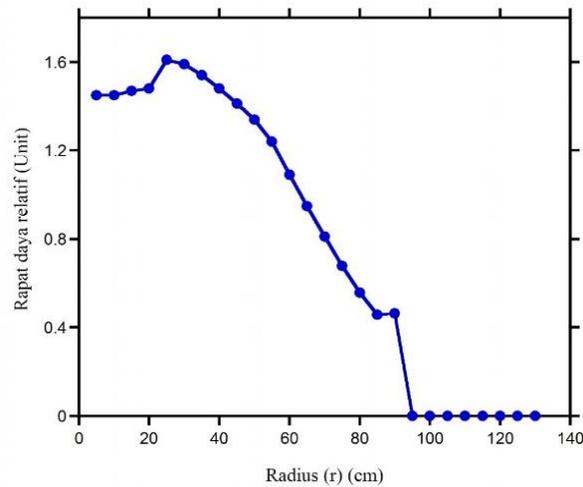
Teras reaktor yang ideal diperoleh dengan memperhatikan nilai faktor puncak daya, rapat daya maksimum dan nilai k -effektif. Hasil dari penelitian ini, yaitu ukuran teras reaktor yang ideal berada pada radius 130 cm, tinggi 270 cm dan pengayaan bahan bakar 2,8263 % menghasilkan nilai k -effektif 1,000004.

Untuk memperoleh nilai rapat daya yang ideal adalah bilamana dapat membuat distribusi daya di dalam teras adalah rata secara radial dan aksial [17]. Distribusi rapat daya arah radial teras reaktor ditunjukkan pada **Gambar 5** dan distribusi rapat daya arah aksial ditunjukkan pada **Gambar 6**.

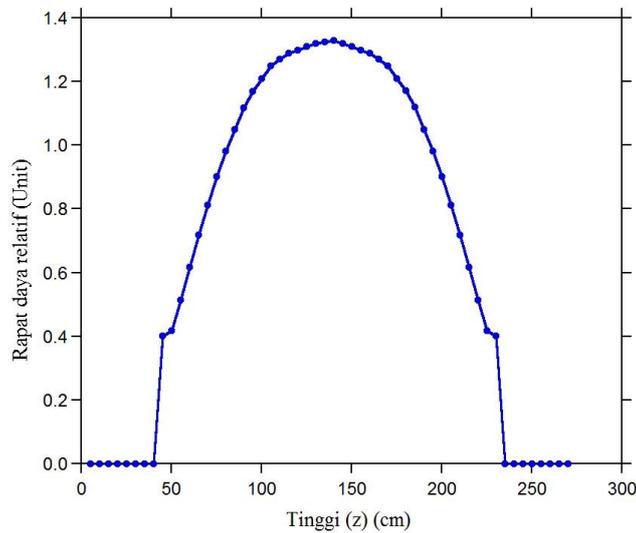
Tampak pada **Gambar 5** bahwa nilai rapat daya relatif semakin menurun pada radius yang semakin mengarah keluar teras reaktor. Hal ini disebabkan adanya bahan reflektor pada bagian luar teras reaktor.



Gambar 4. Konfigurasi teras reaktor.



Gambar 5. Rapat daya pada arah radial teras reaktor.



Gambar 6. Rapat daya arah aksial

Gambar 5 menunjukkan bahwa rapat daya relatif pada radius 0-25 cm mengalami kenaikan dengan nilai faktor puncak daya 1,6141. Kemudian mengalami penurunan hingga radius 130 cm. Pada radius 95 – 130 cm rapat daya yang dihasilkan adalah 0. Hal ini karena pada daerah tersebut populasi neutron sangat sedikit akibat adanya reflektor sehingga reaksi fisi berantai dan distribusi rapat daya tidak terjadi pada daerah tersebut.

Gambar 6 menunjukkan distribusi rapat daya pada arah aksial teras reaktor dengan tinggi teras 270 cm. Tampak pada

Gambar 6 bahwa pada daerah $0 < z < 40$ cm dan daerah $205 < z < 270$ cm rapat daya relatif yang dihasilkan adalah 0. Hal ini karena pada daerah tersebut tidak terjadi reaksi fisi berantai akibat adanya reflektor yang memantulkan neutron ke dalam teras sehingga memungkinkan reaksi fisi berantai berada di tengah teras reaktor. Reaksi fisi berantai terjadi pada daerah $45 < z < 200$ cm sehingga terdapat rapat daya relatif pada daerah tersebut dengan faktor puncak daya 1,3253.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan penelitian dan pembahasan maka dapat disimpulkan bahwa desain inti reaktor SCWR model teras silinder (r,z) menggunakan bahan bakar thorium hasil daur ulang dengan burn 40 GWd/t sebagai *inner fuel* dan 30 GWd/t sebagai *outer fuel* dengan pengayaan 2,8262% berada pada kondisi kritis. Kondisi kritis terjadi pada radius (r) 130 cm dan tinggi (z) 270 cm yang ditunjukkan oleh nilai *k*-efektif sebesar 1,000004. Rapat daya maksimal yang diperoleh sebesar 130,0808 Watt/cm³ terletak pada radius 25 cm dengan faktor puncak daya 1,6063 dan tinggi 135 cm dengan faktor puncak daya 1,3189.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anggoro, Y. D., Dharu, D., Nurlaila., dan Arief, T. Y. 2013. Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 15. No. 2. pp. 69-79.
- [2] Buongiorno, J. 2003. *Generation IV R & D Activities For The Development Of The SCWR*. INEEL. USA.
- [3] Dewita, Erlan. 2012. Analisis Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. Vol. 14. No. 1. pp. 45-56.
- [4] Fegghi, S. A. H., Gholamzadeh, Z., Soltani, L., dan Tenreiro, C. 2013. Comparison of (Th-233U) O₂ and (Th-235U) O₂ Fuel Burn Up Into a Thermal Research Reactor Using MCNPX 2.6 Code. *International Journal of Radiation Research*. Vol. 11. No. 1. pp. 30-33.
- [5] Riska, Dian, F., dan Feriska, H. I. 2016. Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 5. No. 1. pp. 28-31.
- [6] Novalianda, S., Menik, A., Fiber, M., dan Zaki, S. 2016. Studi Awal Perhitungan Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Oksida (UO₂) pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*. Vol. 2. No. 1. pp. 6-15.
- [7] Aida, N. 2015. Perhitungan Burn Up pada Reaktor Subkritis Berdaya Sedang Berpendingin Pb-Bi. *Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN Barat*. pp. 46-52.
- [8] Sari, N. P., Dian F., dan Feriska H. I. 2016. Analisis Neutronik Super Critical Water Reactor (SCWR) dengan Variasi Bahan Bakar (UN-PuN, UC-PuC dan MOX). *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 5. No. 1. pp. 47-52.
- [9] Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Thuchihashi, K. 2006. *A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. JAEA. Japan.
- [10] Irka, H dan Zaki, S. 2015. Analisis Burn Up pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika (JIF)*. Vol. 7. No. 2. pp. 78-85.
- [11] Lamarsh, J. R. 1983. *Introduction To Nuclear Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company. USA.
- [12] Parmanto, S., Harto, A. W., dan Sardjono, Y. 2011. Studi Desain Down Scale Teras Reaktor dan Bahan Bakar PLTN Jenis Pebble Bed Modular Reactor – HTR 100 MWe. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13 No.2. pp. 194-205.
- [13] Rizaal, M., Harto, A.W., dan Sihana. 2011. Analisis Transien pada Fixed Bed Nuclear Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13. No. 3. pp 149-160.
- [14] Lestari, A. M dan Fitriyani, D. 2014. Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC dan MOX terhadap Nilai Breeding Ratio pada Reaktor Pembiak Cepat.

- Jurnal Fisika Unand*. Vol. 3 No. 1. pp. 14.
- [15] Athiqoh, F., Budi, W. S., Anam, C., dan Tjiptono, T. W. 2014. Distribusi Fluks Neutron sebagai Fungsi Burn-Up Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Youngster physics journal*. Vol. 3. No. 2. pp. 108-109.
- [16] Soewono, C. N., Alexander, A dan Sihana. 2009. Implementasi Metode Multi Objectif Simulated Annealing dalam Optimasi Susunan Bahan Bakar Teras Reaktor PWR Menggunakan Code COREBN. *Prosiding Seminar Nasional ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*. pp. 120-121.
- [17] Rokhman, S. N., Widiharto, A., dan Kusnanto. 2011. Performa Neutronik Bahan Bakar LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄ pada Small Mobile-Molten Salt Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. Vol. 13. No. 3. pp. 173-185.

