

Desain Inti (Core) Reaktor SCWR (*Super Critical Water-cooled Reactor*) Tiga Dimensi (X-Y-Z) Menggunakan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang

Sri Harjanti^{(1)*}, Yanti Yulianti⁽¹⁾, Pulung Karo Karo⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung

Jl. Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro No.1 Gedung Meneng Bandar Lampung 35145

*E-mail: sriharjanti111@gmail.com

Diterima (20 November 2017), Direvisi (15 Desember 2017)

Abstract. The research of three-dimensional (X-Y-Z) core design of SCWR reactor using thorium recycled has been done. Neutronic calculations were calculated by SRAC program. Parameters of this research were fuel enrichment, core reactor sizes, core reactor configurations, criticality, and power density distribution. The design of core reactor was 1/8 three-dimensional (X-Y-Z) slab. Fuel reactor was thorium 20 GWd/t burn as inner, and 30 GWd/t burn as outer. Zirconium as cladding, and light water as coolant. Critical condition was achieved at $x = 310$ cm, $y = 170$ cm, $z = 190$ cm and 2,49% of fuel enrichment. Core power reactor was 3.411 MWt, maximum power density was 366,8356 Watt/cc located at $x = 34$ (170 cm), $y = 1$ (5 cm), $z = 38$ (190 cm) and multiplication factor effective (k_{eff}) value was 1.0000000.

Keyword: core design, power density, SCWR, thorium.

Abstrak. Penelitian mengenai desain inti (core) reaktor SCWR tiga dimensi (X-Y-Z) menggunakan thorium hasil daur ulang telah selesai dilakukan. Analisis neutronik menggunakan program SRAC. Parameter yang dianalisis pada penelitian ini meliputi pengayaan bahan bakar, ukuran teras reaktor, konfigurasi teras reaktor, kekritisan, dan distribusi rapat daya. Desain teras reaktor diterapkan pada 1/8 bagian teras reaktor dengan geometri tiga dimensi (X-Y-Z) slab. Bahan bakar yang digunakan yaitu thorium dengan burn 20 GWd/t sebagai *inner fuel*, burn 30 GWd/t sebagai *outer fuel*. Selongsong menggunakan zirconium dan pendingin menggunakan air ringan (H₂O). Kondisi kritis reaktor didapatkan pada $x = 310$ cm, $y = 170$ cm, $z = 190$ cm dan pengayaan bahan bakar 2,49%. Daya teras reaktor pada penelitian ini sebesar 3.411 MWt dengan nilai rapat daya maksimal 366,8356 Watt/cm³ yang terletak pada titik $x = 34$ (170 cm), $y = 1$ (5 cm), $z = 38$ (190 cm) dan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) sebesar 1,000000.

Kata kunci: desain teras reaktor, rapat daya, SCWR, thorium.

PENDAHULUAN

Indonesia termasuk negara dengan tingkat pertumbuhan penduduk yang sangat tinggi sehingga membutuhkan jumlah energi listrik yang besar. Dalam memenuhi permintaan energi listrik yang semakin meningkat, dibutuhkan pengembangan energi terbarukan salah satunya yaitu energi nuklir. PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) merupakan salah satu pertimbangan untuk menjadi sumber energi listrik alternatif di Indonesia.

Akan tetapi pemakaian energi nuklir masih dibayangi masalah kecelakaan reaktor nuklir yang mungkin terjadi misalnya kecelakaan reaktor karena gagalnya batang kendali. Jika batang kendali ini gagal maka populasi neutron akan naik dengan sangat cepat. Jumlah neutron yang tidak terkendali akan menyebabkan kenaikan daya dan temperatur [1]. Karena kecelakaan tersebut bahan bakar reaktor kemungkinan akan meleleh. Akibatnya radiasi nuklir akan keluar dari reaktor yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan alam sekitar. Oleh karena itu,

dikembangkan PLTN generasi IV yang mampu mengatasi masalah tersebut.

PLTN generasi IV perlu memenuhi empat persyaratan utama yaitu kesinambungan (*sustainability*), keekonomian (*economics*), keamanan (*safety*) dan keandalan (*reliability*) [2]. *Super Critical Water-cooled Reactor* (SCWR) merupakan salah satu jenis reaktor generasi IV. Sebagian besar konsep SCWR dioperasikan pada spektrum termal [3]. Konsep dasar dari sebuah reaktor adalah reaksi fisi dari sebuah material misalnya Uranium-233. Ketika sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron, inti akan mengalami pembelahan [4].

Selain uranium bahan lain yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yaitu thorium. Thorium memiliki faktor kapasitas pembangkit yang lebih tinggi dibanding uranium [5]. Pemanfaatan siklus thorium akan memberikan proses *burn up* berlangsung lebih lama dan merupakan strategi efektif dan efisien yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir alternatif disamping uranium [6]. Dalam penelitian ini dilakukan pendesainan inti (*core*) reaktor SCWR menggunakan thorium hasil daur ulang untuk menghasilkan reaktor yang memenuhi standar kekritisasi.

METODE PENELITIAN

Desain teras reaktor dilakukan melalui simulasi komputasi menggunakan program SRAC yang dikembangkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energi Research Institute*). Penelitian ini diawali dengan menentukan fraksi volume pada material teras reaktor yang meliputi bahan bakar, selongsong dan pendingin. Selanjutnya, dilakukan perhitungan densitas atom pada masing-masing material dan pengayaan

bahan bakar. Dalam penelitian, dilakukan variasi pengayaan sebesar 1-5%. Adapun perhitungan densitas atom sebagai fungsi pengayaan (*enrichment*) dapat digunakan persamaan berikut [7].

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

dengan N = densitas atom (atom/cm³), ρ = massa jenis (gram/cm³), M = massa molekul (gram/mol) dan N_A = bilangan Avogadro (6,02x10²³ atom/mol).

Kemudian, menentukan spesifikasi desain reaktor menggunakan program SRAC-PIJ. Dalam PIJ dapat ditentukan spesifikasi inti reaktor yang akan dihitung, diantaranya mencakup geometri teras, jenis material bahan bakar, struktur grup energi dan penampang lintang mikroskopis dan makroskopik. Hasil yang didapatkan dari proses PIJ nantinya akan digunakan dalam perhitungan *burn up*. Pada perhitungan *burn up*, keluaran (*output*) yang dihasilkan dimasukkan ke dalam MACRO berupa bahan bakar yang telah dibakar untuk beberapa periode.

Selanjutnya, nilai dari MACRO akan digunakan dalam menentukan ukuran, konfigurasi, dan perhitungan inti reaktor menggunakan program SRAC-CITATION untuk mencari faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dan distribusi kerapatan daya (*power density*) dari teras reaktor. Ukuran panjang (x) teras reaktor divariasikan dari 170-310 cm, sedangkan ukuran lebar (y) teras reaktor divariasikan dari 150-210 cm, dan tinggi (z) teras reaktor tetap yaitu 190 cm. Hasil perhitungan yang didapatkan berupa distribusi kerapatan daya (*power density*) dari teras reaktor, data ini kemudian akan di-plot ke dalam bentuk grafik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fraksi Volume

Untuk melakukan analisis reaksi yang terjadi di dalam reaktor, besarnya persentase dari jumlah partikel material penyusun bahan bakar perlu diketahui sehingga dilakukan perhitungan fraksi volume. Fraksi volume bahan bakar adalah perbandingan volume bahan bakar terhadap volume keseluruhan pin bahan bakar yang meliputi bahan bakar, selongsong dan moderator [4]. Pada penelitian ini, digunakan fraksi bahan bakar 36,662%, fraksi selongsong 14,998% dan fraksi pendingin 48,340% seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Spesifikasi Desain Reaktor

Dalam penelitian, desain reaktor yang digunakan adalah salah satu jenis reaktor generasi IV yaitu *SuperCriticalWater-cooledReactor* (SCWR). Spesifikasi

SCWR yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 2**. Bahan bakar berperan dalam berlangsungnya reaksi fisi agar dapat menghasilkan panas yang diperlukan. Pada penelitian, bahan bakar menggunakan thorium (Th^{232}) hasil daur ulang. Alasan utama penggunaan Th^{232} sebagai bahan bakar nuklir dikarenakan lebih aman, lebih murah dan lebih ramah lingkungan. Th^{232} lebih aman karena tidak memiliki isotop yang bersifat fisil sehingga tidak cocok digunakan untuk senjata nuklir [8]. Namun, Th^{232} yang bersifat fertil tidak dapat langsung digunakan dalam reaktor termal melainkan akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat untuk menghasilkan U^{233} . Setelah menyerap satu neutron dan diikuti dengan reaksi peluruhan β , Th^{232} bertransmutasi menjadi isotop U^{233} yang akan digunakan sebagai komponen penggerak (*driver*) untuk memicu terjadinya reaksi fisi berantai [9].

Tabel 1. Fraksi volume bahan bakar, selongsong dan pendingin

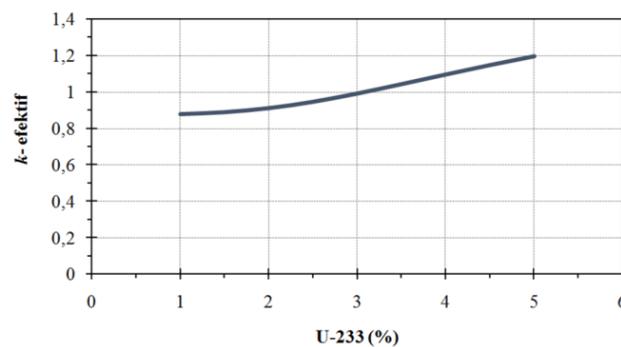
Komponen	Radius (cm)	Area (cm ²)	Fraksi volume (%)
Bahan bakar	0,386	0,4678	36,662
Selongsong	0,4582	0,6592	14,998
Pendingin	0,6375	1,2761	48,340

Tabel 2. Spesifikasi desain reaktor SCWR

Parameter	Deskripsi
Geometri sel bahan bakar	Hexagonal
Geometri teras	3-D (X,Y,Z)slab
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	Th^{232} dan U^{233} (hasil daur ulang)
Selongsong (<i>cladding</i>)	Zirconium
Pendingin (<i>coolant</i>)	Air ringan (H ₂ O)
Fraksi bahan bakar	36,662%
Fraksi selongsong	14,998%
Fraksi pendingin	48,340%

Tabel 3. Pengayaan bahan bakar beserta harga k_{eff} yang dihasilkan

Pengayaan U-233(%)	k_{eff}
1	0,879996
1,5	0,890688
2	0,912824
2,5	0,947515
3	0,992716
3,5	1,043960
4	1,096755
4,5	1,148146
5	1,196345



Gambar 1. Pengaruh pengayaan bahan bakar U^{233} terhadap nilai k_{eff}

Selongsong berfungsi mencegah adanya kebocoran selama reaksi fisi berlangsung [10]. Dalam penelitian selongsong menggunakan *zirconium*. Alasan utama pemilihan *zirconium* adalah tahan korosi, serapan neutron rendah dan memiliki sifat tahan terhadap temperatur tinggi [11]. Sedangkan pendingin berperan untuk mengambil panas yang dibangkitkan dari reaksi fisi di dalam teras reaktor. Pada penelitian, pendingin menggunakan air ringan (H_2O).

Pengayaan Bahan Bakar

Pengayaan dilakukan agar reaksi fisi terjadi di dalam teras reaktor. Terjadinya reaksi fisi ditunjukkan oleh faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Tabel 3 merupakan persentase pengayaan U^{233} beserta harga k_{eff} yang dihasilkan.

Adapun pengaruh pengayaan bahan bakar terhadap k_{eff} ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan gambar tersebut memperlihatkan bahwa semakin tinggi

persentase pengayaan bahan bakar, maka nilai k_{eff} yang dihasilkan semakin tinggi pula. Hal ini dikarenakan dengan bertambahnya persentase pengayaan akan menambah jumlah uranium (U^{233}) yang ditambahkan ke dalam reaktor dan mengakibatkan reaksi fisi yang terjadi semakin meningkat. Ketika reaksi fisi meningkat maka populasi neutron yang dihasilkan pada satu generasi lebih banyak dibandingkan generasi sebelumnya, sehingga k_{eff} yang dihasilkan semakin tinggi.

Perhitungan *Burn up*

Perhitungan *burn up* merupakan perhitungan yang menitikberatkan pada manajemen bahan bakar yaitu proses pembakaran, pengolahan serta banyaknya energi yang dihasilkan persatuan berat bahan bakar yang dinyatakan dalam MWd/t (jumlah energi yang telah dihasilkan dalam megawatt-hari dari tiap ton uranium) [12]. Dalam penelitian, *step*

burn up yang digunakan sebanyak 7 step dengan periode pada masing-masing step burn up yaitu 1.000, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 30.000, dan 40.000 MWd/t. Daya linier yang dihasilkan sebesar 160 W/cm. **Tabel 4** merupakan keluaran dari perhitungan burn up. **Tabel 4** menunjukkan bahwa keluaran yang dihasilkan pada MACRO yaitu bahan bakar thorium dengan burn 10 GWd/t yang dalam program SRAC dilambangkan BURNA310, 20 GWd/t dilambangkan BURNA510, dan 30 GWd/t dilambangkan BURNA610. Berdasarkan keluaran yang dihasilkan pada MACRO dapat ditentukan bahan bakar yang digunakan. Pada penelitian digunakan thorium dengan burn 20 GWd/t dan 30 GWd/t. Penggunaan bahan bakar yang telah di-burn 20 GWd/t dan 30 GWd/t dikarenakan pada bahan bakar tersebut telah terjadi penyusutan bahan bakar yang lebih besar dibandingkan burn 10 GWd/t. Hal ini disebabkan semakin besar tingkat burn up maka akan berkurang jumlah atom dari bahan bakar yang menyebabkan terjadinya penyusutan.

Dengan adanya penyusutan bahan bakar maka reaksi fisi yang terjadi semakin berkurang dan neutron yang dihasilkan semakin sedikit. Kondisi seperti ini membuat reaktor berada dalam kondisi subkritis yang menunjukkan reaktor lama-kelamaan akan mati dan berhenti beroperasi dengan sendirinya akibat daya reaktor yang habis. Sehingga untuk menghasilkan reaktor dalam kondisi kritis maka perlu dilakukan perubahan konfigurasi bahan bakar reaktor dengan cara menggeser bahan bakar.

Ukuran Teras Reaktor

Ukuran panjang (x) teras reaktor divariasikan dari 170-310 cm, sedangkan ukuran lebar (y) teras reaktor divariasikan dari 150-210 cm, dan tinggi (z) teras reaktor tetap yaitu 190 cm. **Tabel 5** menunjukkan variasi ukuran panjang teras reaktor dan **Tabel 5** merupakan variasi ukuran lebar teras reaktor beserta harga k_{eff} yang dihasilkan.

Tabel 4. Keluaran pada perhitungan burn up

Kode Material	Keterangan
BURNA310	Fuel 10 GWd/t
BURNA510	Fuel 20 GWd/t
BURNA610	Fuel 30 GWd/t

Tabel 5. Variasi panjang (x) teras reaktor pada lebar (y) 170 cm dan tinggi (z) 190 cm

x (cm)	k_{eff}
170	0,9927189
180	0,9929997
190	0,9930075
200	0,9939238
210	0,9956514
220	0,9963033
230	0,9967196
240	0,9965739
250	0,9968351
260	0,996766
270	0,9967042
280	0,996704
290	0,997781
300	0,999752
310	1,0001761

Penentuan ukuran lebar (y) teras reaktor dilakukan setelah mendapatkan ukuran panjang teras reaktor yang paling optimum. Dalam penelitian ini, didapatkan ukuran panjang teras reaktor yaitu 310 cm sehingga dapat ditentukan ukuran lebar teras reaktor seperti yang tertera pada **Tabel 6**. Berdasarkan **Tabel 6**, reaktor dalam keadaan kritis ketika panjang teras reaktor sebesar 310 cm, lebar 170 cm dan tinggi 190 cm dengan k_{eff} sebesar 1,0001761.

Konfigurasi Teras Reaktor

Teras reaktor terdiri dari bahan bakar, selongsong, dan reflektor. Pada konfigurasi penempatan bahan bakar, bahan bakar dalam (*inner fuel*) diisi thorium dengan $burn_{20}$ GWd/t dan bahan bakar luar (*outer fuel*) diisi dengan $burn_{30}$ GWd/t. Hal ini dimaksudkan agar kuantitas daya yang dihasilkan lebih besar sehingga reaktor berada dalam

kondisi kritis. Konfigurasi teras reaktor dapat dilihat pada **Gambar 2**.

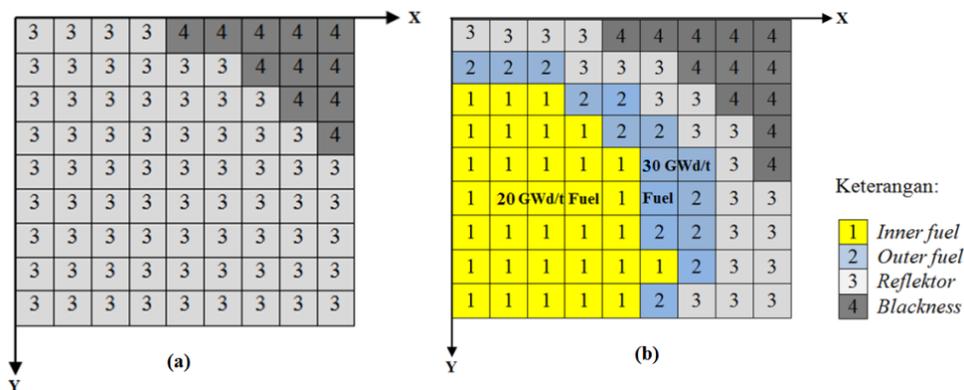
Berdasarkan **Gambar 2a** konfigurasi teras pada tinggi teras 0-20 cm merupakan bagian dari reflektor dan *blackness*. Sedangkan **Gambar 2b** konfigurasi teras pada tinggi teras 20-190 cm merupakan bagian bahan bakar yaitu $burn_{20}$ GWd/t digunakan sebagai *inner fuel* dan $burn_{30}$ GWd/t sebagai *outer fuel*.

Distribusi Kerapatan daya

Selain kriteria kekritisan, analisis neutronik lain yang perlu diperhatikan yaitu distribusi kerapatan daya (*power density*). Rapat daya merupakan besarnya daya yang dihasilkan per satuan volume. Kondisi ideal dari distribusi kerapatan daya adalah merata dalam teras secara radial maupun aksial dengan batas aman tertinggi rapat daya maksimum adalah 660 Watt/cm³ [4].

Tabel 6. Variasi lebar (y) teras reaktor pada panjang (x) 310 cm dan tinggi (z) 190 cm

y (cm)	k_{eff}
150	0,9971499
160	0,9998598
170	1,0001761
180	1,0005296
190	1,0005184
200	1,0008945
210	1,0020733



Gambar 2. Konfigurasi teras reaktor pada tinggi teras a) $0 < z < 20$ cm dan b) $20 < z < 190$ cm

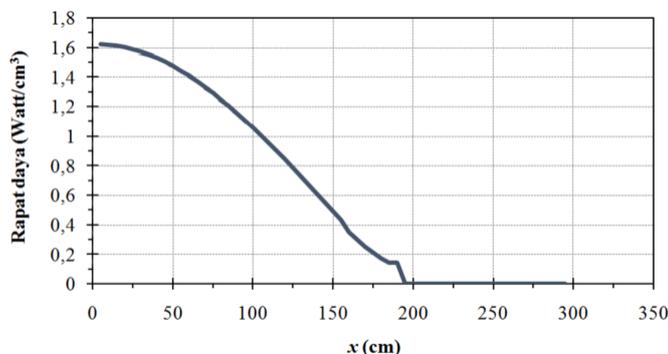
Berdasarkan perhitungan faktor multiplikasi dengan pengayaan bahan bakar sebesar 2,49% dengan panjang teras 310 cm, lebar 170 cm, tinggi 190 cm dan thorium dengan burn 20 GWd/t sebagai inner fuel, burn 30 GWd/t sebagai outer fuel diperoleh pengaruh distribusi kerapatan daya terhadap masing-masing ukuran teras reaktor. Berdasarkan perhitungan pada CITATION didapatkan nilai rapat daya maksimum sebesar 366,8356 Watt/cm³ yang terletak pada titik $x = 34$ (170 cm), $y = 1$ (5 cm) dan $z = 38$ (190 cm). Berikut ini disajikan distribusi kerapatan daya yang dihasilkan pada masing-masing ukuran teras reaktor seperti yang terlihat pada Gambar 3, 4 dan 5.

Dari Gambar 3 terlihat nilai rapat daya yang dihasilkan merata (flat). Hal ini dikarenakan inner fuel yang digunakan yaitu burn 20 GWd/t dan outer fuel yaitu burn 30 GWd/t. Pada daerah inner fuel (5-100 cm) penyusutan bahan bakar yang terjadi tidak terlalu besar. Namun pada daerah outer fuel (105-195) rapat daya semakin menurun dikarenakan terjadi penyusutan bahan bakar yang lebih besar dan menyebabkan reaksi fisi yang dihasilkan terus berkurang. Seiring bertambahnya panjang teras reaktor (200-310 cm), rapat daya bernilai nol. Hal ini menunjukkan panjang teras reaktor mengarah ke bagian reflector dan blackness. Pada bagian ini tidak terjadi reaksi fisi. Berdasarkan perhitungan

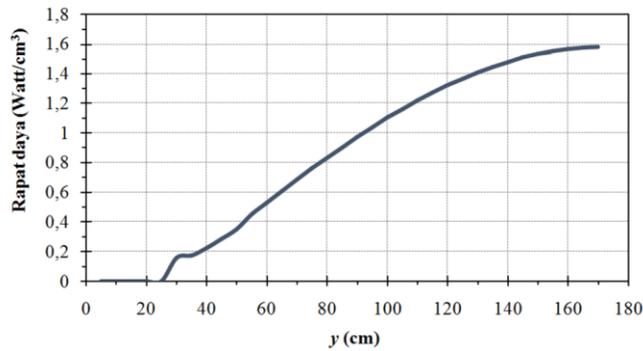
menggunakan CITATION didapatkan daya rata-rata pada panjang (x) 34 sebesar 225,5558 Watt/cm³ dengan faktor puncak (peak) daya 1,62636.

Nilai rapat daya pada lebar (y) dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa nilai rapat daya pada daerah lebar teras 5-25 cm bernilai nol. Hal ini dikarenakan pada daerah tersebut merupakan bagian blacknes dan reflektor. Pada bagian ini tidak ada reaksi fisi yang terjadi sehingga rapat daya yang dihasilkan nol. Namun seiring dengan bertambahnya lebar teras reaktor nilai rapat daya yang dihasilkan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan arah lebar teras reaktor yang mengarah ke dalam menuju bagian bahan bakar. Dengan meningkatnya nilai rapat daya menunjukkan bahwa terjadinya reaksi fisi berantai di dalam teras reaktor. Berdasarkan perhitungan rapat daya pada CITATION didapatkan rapat daya rata-rata pada lebar (y) 1 sebesar 232,4088 Watt/cm³ dengan faktor puncak (peak) daya 1,57841. Besarnya rapat daya pada tinggi (z) teras reaktor ditampilkan pada Gambar 5.

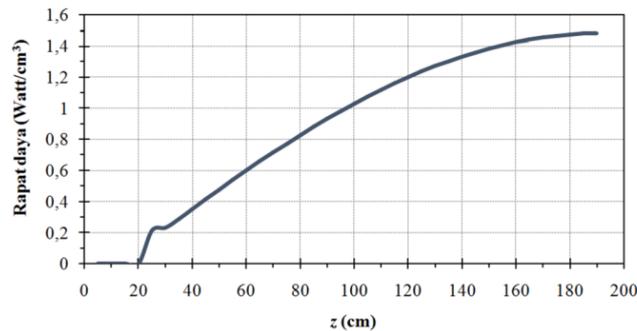
Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa rapat daya pada tinggi 0-20 cm bernilai nol. Pada tinggi ini (0-20 cm) merupakan bagian blacknes dan reflektor. Sedangkan pada tinggi teras reaktor 20 cm-190 cm rapat daya yang dihasilkan semakin meningkat yang mengarah ke inti reaktor.



Gambar 3. Rapat daya pada panjang (x) teras reaktor



Gambar 4. Rapat daya pada lebar (y) teras reaktor



Gambar 5. Rapat daya pada tinggi (z) teras reaktor

Hal ini menandakan bahwa pada bagian tersebut (inti reaktor) merupakan tempat yang paling banyak terjadi reaksi fisi. Dari perhitungan rapat daya menggunakan CITATION didapatkan nilai rapat daya rata-rata pada tinggi (z) 38 sebesar 247,4142 Watt/cm³ dengan faktor puncak (*peak*) daya 1,48267.

Desain Reaktor Ideal

Setelah dilakukan perhitungan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dan analisis distribusi kerapatan daya diperoleh desain teras reaktor yang ideal yaitu pada konfigurasi pengayaan 2,49% dengan panjang teras 310 cm, lebar 170 cm, dan tinggi 190 cm. Thorium dengan *burn* 20 GWd/t sebagai *inner fuel*, *burn* 30 GWd/t sebagai *outer fuel* dan diperoleh k_{eff} sebesar 1,000000. Daya teras reaktor pada penelitian ini sebesar 3.411 MWt dengan nilai rapat daya maksimal sebesar 366,8356 Watt/cm³ yang terletak pada titik $x = 34$ (170 cm), $y = 1$ (5 cm) dan $z = 38$ (190 cm).

KESIMPULAN

Setelah dilakukan penelitian, analisis dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa desain teras (*core*) tiga dimensi (X-Y-Z) reaktor SCWR menggunakan thorium hasil daur ulang berada dalam kondisi kritis yaitu pada pengayaan bahan bakar 2,49% dengan nilai k_{eff} yang dihasilkan sebesar 1,000000. Teras reaktor mencapai keadaan kritis pada konfigurasi teras reaktor dengan ukuran $x = 310$ cm, $y = 170$ cm, $z = 190$ cm, *burn* 20 GWd/t sebagai *inner fuel* dan *burn* 30 GWd/t sebagai *outer fuel*. Daya teras reaktor pada penelitian ini sebesar 3.411 MWt dengan nilai rapat daya maksimal 366,8356 Watt/cm³ yang terletak pada titik $x = 34$ (170 cm), $y = 1$ (5 cm) dan $z = 38$ (190 cm) dengan rapat daya rata-rata pada $x = 34$ sebesar 225,5558 Watt/cm³, $y = 1$ sebesar 232,4088 Watt/cm³ dan $z = 38$ sebesar 247,4142 Watt/cm³.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Yulianti, Z. Su'ud, A. Waris, and S. Khotimah, "Analisis Persamaan Difusi Ruang-Waktu Silinder 1-Dimensi Pada Kecelakaan Reaktor Utop (Unprotected Transient Over Power) Untuk Jenis Reaktor Cepat," *J. Sains MIPA*, vol. 15, no. 2, pp. 100–110, 2009.
- [2] Zuhair and Suwoto, "Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar Dan Moderator Teras RGTT200K," in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTNBR-BATAN*, 2013, pp. 533–541.
- [3] A. Yamaji, Y. Oka, and S. Koshizuka, "Three-dimensional core design of high temperature supercritical-pressure light water reactor with neutronic and thermal-hydraulic coupling," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 8–19, 2005.
- [4] J. Duderstadt and L. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [5] S. Topan and Z. Suud, "Neutronic Study Design of Very Small Long Life PWR with (Th,U) O2 Fuel," in *Tokyo Tech COE INES-Indonesia International Symposium*, 2005, pp. 41–44.
- [6] J. Breza, P. Dařilek, and V. Nečas, "Study of thorium advanced fuel cycle utilization in light water reactor VVER-440," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 37, no. 5, pp. 685–690, 2010.
- [7] P. F. Zweifel, *Reactor Physics*. USA: McGraw-Hill, Inc, 1973.
- [8] T. Kamei and S. Hakami, "Evaluation of implementation of thorium fuel cycle with LWR and MSR," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 53, no. 7, pp. 820–824, 2011.
- [9] T. Schulenberg and J. Starflinger, "Core Design Concepts for High Performance Light Water Reactors," *Engineering*, pp. 249–256, 2007.
- [10] L. Cao, O. Yoshiaki, S. Zhi, and I. Yuki, "Fuel, Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor," *Nucl. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 2, pp. 138–148, 2008.
- [11] D. . Lambert and R. Strain, *Oxide Fuel*. Germany: Wiley-VCH, 2006.
- [12] A. Waltar and A. Reynolds, *Fast Breeder Reactor*. USA: Pergamon Press, 1981.

