

Desain Reaktor Air Superkritis (*Super Critical Water Reactor*) dengan Bahan Bakar Thorium

Design of Supercritical Water Reactor with Thorium Fuel Cell

Rina Utami^{*)} dan Yanti Yulianti
Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung
^{*)}Email: rinautami39@ymail.com

ABSTRACT

The research of desain of super critical water reactor (SCWR) thorium fuel has been done. The objective of this research is to obtain the design with high thermal power and inherent safety features. The analyzed parameters were: core fuel enrichment, reactor size, criticality, and power density distribution. A core calculation of x , y , z was achieved by CITATION code. Fuel composition and core configurations in critical condition were calculated by variation of fuel enrichment, reactor size and configuration of the fuel in the core. SCWR used thorium as fuel, stainless steel as cladding, light water as moderator and coolant as well. This research obtained critical core design that is size $x = 85$ cm, $y = 85$ cm and $z = 180$ cm. The critical condition can be achieved when the inner fuel loaded about 2.23% fuel enrichment and outer fuel 1.5% fuel enrichment. The design produced 1000 MW thermal power, the maximum power density is 625.675 Watts /cc and k -effective value is 1.000274. The reactor core in this research fulfills the inherent safety standard in term of neutronic aspect.

Keywords : Core design, SCWR, thorium, power density, passive safety

PENDAHULUAN

Masalah energi merupakan salah satu hal yang sedang hangat dibicarakan saat ini. Energi nuklir adalah satu alternatif sumber energi yang layak dikembangkan. Uranium merupakan bahan bakar utama untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. Konsep dasar dari sebuah reaktor adalah reaksi fisi dari sebuah material misalnya Uranium-235. Ketika sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron, dengan persentase tertentu inti akan mengalami pembelahan (fisi) (Zweifel, 1973). Secara umum perubahan jumlah neutron akibat reaksi fisi dapat dirumuskan k -efektif atau sering disebut dengan faktor multiplikasi. Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor, dimana keadaan stabil (kritis) dicapai jika nilai k -efektif = 1 (Pramuditya dan Waris, 2005).

Selain Uranium bahan lain yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir adalah Thorium. Bahan bakar Thorium semakin menarik perhatian karena lebih aman dan lebih murah (Kidd, 2009). Bahan bakar Thorium telah dikaji sebagai alternatif bahan bakar nuklir pada reaktor jenis PWR dan CANDU untuk menghemat sumber daya uranium dan menyediakan sumber energi yang mandiri (Jeong, et al, 2008). Bahan bakar Thorium juga dapat dioperasikan dengan aman pada reaktor

jenis BWR (Carrera, et al, 2007). Selain itu jenis reaktor yang dikenal menggunakan bahan bakar Thorium adalah Reaktor Garam Cair (*Molten Salt Reactors/MSR*) (Weinberg, 1997).

Reaktor air superkritis (SCWR) merupakan reaktor termal yang dipromosikan sebagai reaktor masa depan generasi IV (Buongiorno, 2003). Desain dari perakitan bahan bakar adalah hal yang penting dalam penelitian dan pengembangan SCWR (Koning dan Rochman, 2008). PLTN harus memenuhi standar keamanan pasif (Sembiring, 2010).

Dalam penelitian ini akan dibahas bagaimana komposisi bahan bakar, ukuran dan konfigurasi teras reaktor pada jenis SCWR untuk menghasilkan energi yang maksimal dan memenuhi standar keamanan pasif. bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah Thorium dengan pengayaan tertentu.

METODE

Desain teras reaktor dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu penghitungan densitas atom (*Atomic density*), menentukan ukuran dan konfigurasi reaktor, kemudian melakukan penghitungan dengan CITATION pada program SRAC.

Penghitungan densitas atom dilakukan pada pengayaan bahan bakar yang bervariasi jumlahnya. Pada masing-masing pengayaan

bahan bakar dapat diketahui nilai k -efektif yang menunjukkan kekritisan reaktor. Penghitungan densitas atom digunakan sebagai input pada CITATION. Densitas atom dihitung dengan persamaan berikut (Zweifel, 1973).

$$N_v = \frac{n_v L_0 Z_v}{M_v} \quad (1)$$

Dengan:

- N_v = densitas atom
- n_v = densitas massa (gram/cm³)
- L_0 = bilangan avogadro
(0,602x10²⁴ molekul/mol)
- Z_v = nomor atom
- M_v = nomor massa (gram/mol)

Ukuran teras reaktor dihitung secara tiga dimensi yaitu panjang (x), lebar (y) dan tinggi (z). Untuk mendapatkan model reaktor yang ideal dilakukan dengan menentukan ukuran teras kemudian mengubah-ubah konfigurasi bahan bakar pada teras reaktor.

Hasil penghitungan yang dilakukan sebelumnya akan menjadi input pada CITATION. Penghitungan pada CITATION menghasilkan output yang akan menunjukkan apakah model reaktor yang dibuat berada dalam keadaan kritis, menghasilkan energi yang maksimal dan memenuhi standar keamanan (*passive safety*). Output yang akan dianalisis sebagai standar adalah faktor multiplikasi (k -efektif) dan distribusi rapat daya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Bahan Bakar

Bahan bakar Thorium tidak bersifat fisil, oleh karena itu membutuhkan komponen penggerak untuk memicu terjadinya reaksi fisi (Kidd, 2009). Pada penelitian ini digunakan Uranium-233 sebagai komponen penggerak yang bersifat fisil. Karakteristik bahan bakar SCWR pada penelitian ini disajikan dalam Tabel 1. Komposisi bahan bakar untuk inner fuel dengan pengayaan 1-5% sedangkan untuk outer fuel dengan pengayaan 1,5%. Pengayaan bakar ini dilakukan agar reaksi fisi terjadi di dalam reaktor (Info Nuklir 2012). Terjadinya reaksi fisi ditunjukkan oleh faktor multiplikasi (k -efektif). Harga k -efektif digunakan sebagai parameter suatu teras reaktor apakah dalam keadaan subkritis, kritis atau superkritis (Zweifel, 1973).

Tabel 1. Karakteristik bahan bakar SCWR

Bahan bakar	
Material	Th-232, U-233
Temperatur	927 °C
Massa Jenis	10,5 gr/cm ³ (Shan, et al, 2010)
Pengayaan	Inner (1-5%) Outer (1,5%)
Kelongsong (Cladding)	
Material	Stainless Stell 304
Temperatur	600 °C
Massa jenis	8 gr/cm ³ (Engineering Toolbox, 2012)
Moderator	
Material	Air ringan (H ₂ O)
Temperatur	385 °C
Massa jenis	0,78 gr/cm ³ (Csom, et al, 2012)

Pengayaan bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini beserta dengan harga k -efektif yang dihasilkan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengayaan bahan bakar

U-233 (%)	k -efektif
1	0,7062315
1,5	0,8456474
2	0,9859488
2,5	1,096579
3	1,185483
3,5	1,258296
4	1,319047
4,5	1,370452
5	1,414522

Gambar 1 menunjukkan grafik peningkatan persentase pengayaan bahan bakar terhadap k -efektif.



Gambar 1. Pengaruh pengayaan bahan bakar terhadap k -efektif

Sebuah reaktor berada dalam keadaan kritis jika harga k -efektif sama dengan satu ($k=1$) (Zweifel, 1973). Pada Gambar 1 terlihat bahwa harga k -efektif yang paling mendekati 1,000 adalah pada komposisi bahan bakar Uranium-

233 dengan pengayaan sebanyak 2,1% untuk posisi *inner fuel* dan 1,5 % untuk posisi *outer fuel*. Hal ini menunjukkan bahwa pada komposisi tersebut jumlah neutron yang lahir seimbang dengan jumlah neutron yang hilang dan reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor telah terkendali. Semakin tinggi pengayaan bahan bakar semakin tinggi pula harga *k*-efektif karena penampang lintang (*cross section*) semakin besar sehingga kemungkinan (probabilitas) terjadinya reaksi atau interaksi nuklir semakin besar pula sehingga jumlah neutron semakin meningkat.

Ukuran Teras Reaktor

Ukuran tinggi teras reaktor (*z*) pada penelitian ini divariasikan ukurannya yaitu mulai dari 100-200 cm sedangkan ukuran panjang dan lebarnya (*x* dan *y*) tidak berubah yaitu 85 cm. Hal ini digunakan untuk melihat kecenderungan harga *k*-efektif terhadap ukuran tinggi teras reaktor. Tabel 3 menunjukkan ukuran tinggi teras reaktor dan harga *k*-efektif yang diperoleh. Pada Tabel 3 terlihat pengaruh ukuran tinggi teras reaktor terhadap *k*-efektif. Semakin tinggi ukuran teras reaktor semakin tinggi pula harga *k*-efektif. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah reaksi fisi yang terjadi di dalam teras reaktor semakin meningkat.

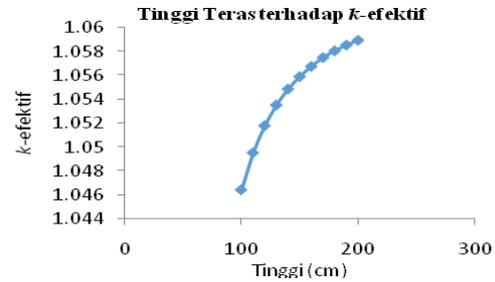
Tabel 3. Tinggi teras reaktor dan *k*-efektif

Tinggi (cm)	<i>k</i> -efektif
100	1,04647
110	1,049571
120	1,051829
130	1,053562
140	1,054898
150	1,055937
160	1,056793
170	1,057529
180	1,058095
190	1,058575
200	1,058974

Pengaruh tinggi teras reaktor terhadap harga *k*-efektif yang diperoleh seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Ukuran teras reaktor yang semakin besar menyebabkan ruang gerak bagi inti untuk bereaksi fisi semakin luas sehingga reaksi fisi yang terjadi semakin meningkat dan

menghasilkan neutron dengan jumlah yang lebih banyak.



Gambar 2. Pengaruh tinggi teras terhadap *k*-efektif

Konfigurasi Teras Reaktor

Teras reaktor terdiri dari bahan bakar, moderator dan reflektor dengan konfigurasi tertentu. Pada penelitian ini penghitungan *k*-efektif dilakukan untuk mengetahui karakteristik neutron di dalam teras reaktor sehingga teras reaktor dapat beroperasi dengan aman yaitu dengan nilai *k*-efektif sama dengan satu (*k*=1) yang berarti bahwa reaktor berada dalam keadaan kritis. Karakteristik dari teras reaktor yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik teras SCWR

Daya termal	1000 (MWth)
Tinggi teras	180 cm
Radius teras	85 cm
Jumlah mesh	17 x 17 x 36
Pendingin	Air ringan (H ₂ O)
Suhu pendingin	385 °C
Tekanan sistem	25 MPa

Karakteristik teras SCWR pada tabel di atas digunakan sebagai *input* penghitungan yang dilakukan dengan menggunakan salah satu dari kode dasar pada SRAC yaitu CITATION yang merupakan penghitungan secara tiga dimensi (*x, y, z*). Perhitungan dilakukan pada ¼ bagian teras dengan jumlah *mesh* 17 x 17 x 36 dan berbentuknya simetris. Bentuk *mesh* adalah bujur sangkar (*square*) dengan ukuran 5 cm pada semua arah.

Desain konfigurasi teras reaktor diatur sedemikian rupa dengan ukuran tertentu dan bahan bakar dengan pengayaan tertentu sehingga diperoleh bentuk teras reaktor yang mampu mencapai keadaan kritis, memenuhi

kriteria keselamatan dan menghasilkan daya termal yang maksimal.

Gambar 3 menunjukkan konfigurasi teras reaktor pada tinggi 20 – 160 cm dan Gambar 4 menunjukkan konfigurasi untuk teras reaktor pada tinggi 0 - 20 cm yang diperoleh pada penelitian ini. Konfigurasi teras reaktor disusun berdasarkan karakteristik seperti yang telah ditampilkan pada Tabel 4.

	5	15	25	35	45	55	65	75	85	x
10	3	3	3	3	4	4	4	4	4	
20	2	2	2	3	3	3	4	4	4	
30	1	1	1	2	2	3	3	4	4	
40	1	1	1	1	2	2	3	3	4	
50	1	1	1	1	2	2	2	3	4	
60	1	1	1	1	2	2	2	3	3	
70	1	1	1	1	1	1	1	2	3	
80	1	1	1	1	1	1	1	2	3	
85	1	1	1	1	1	1	1	1	3	
y										

Gambar 3. Konfigurasi teras reaktor pada $20 \leq z \leq 180$

	5	15	25	35	45	55	65	75	85	x
10	3	3	3	3	4	4	4	4	4	
20	3	3	3	3	3	3	4	4	4	
30	3	3	3	3	3	3	3	4	4	
40	3	3	3	3	3	3	3	3	4	
50	3	3	3	3	3	3	3	3	4	
60	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
70	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
80	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
85	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
y										

Gambar 4. Konfigurasi teras reaktor pada $0 \leq z \leq 20$

Keterangan :

1	Inner fuel
2	Outer fuel
3	Moderator
4	Blackness

Setelah dilakukan penghitungan dengan CITATION, teras reaktor dengan konfigurasi tersebut mengalami keadaan kritis ketika diberi bahan bakar dengan pengayaan sebanyak 2,23% untuk *inner fuel* dan 1,5% untuk *outer fuel*, dan ukuran tinggi teras 180 cm

ditunjukkan dengan harga *k*-efektif sebesar 1,000274.

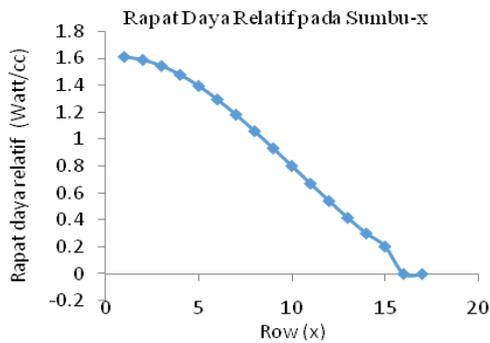
Selain kriteria keselamatan yang ditunjukkan dengan harga *k*-efektif, hal lain yang juga harus diperhatikan yaitu besarnya rapat daya (*power density*). Rapat daya reaktor yaitu besarnya daya yang dihasilkan per satuan volume (Alfa, 2005). Berdasarkan penghitungan dengan CITATION diperoleh nilai rapat daya maksimal sebesar 625, 675 Watt/cc yang terletak pada titik $x = 17, y = 1$ dan $z = 36$. Batas aman tertinggi rapat daya maksimum adalah sebesar 660 Watt/cc (Deuderstadt, *et al*, 1976).

Penghitungan rapat daya pada CITATION menunjukkan bahwa rapat daya rata-rata pada sumbu-*x* (*row*) 17 adalah sebesar 388,9612 Watt/cc. Besarnya rapat daya relatif pada sumbu *x* ditampilkan pada Tabel 5, tampak pada Tabel 5 bahwa nilai rapat daya relatif semakin menurun pada sumbu *x* yang semakin mengarah keluar yaitu bagian moderator dan *blackness*. Hal ini disebabkan oleh karena pada bagian moderator dan *blackness* tidak terjadi reaksi fisi.

Tabel 5. Rapat daya relatif pada sumbu x

x	Rapat daya relatif (Watt/cc)
1	1,60858
2	1,586014
3	1,541542
4	1,476482
5	1,392812
6	1,293133
7	1,180599
8	1,058714
9	0,9309828
10	0,8004858
11	0,6696983
12	0,5406704
13	0,4158401
14	0,3006878
15	0,2037596
16	0
17	0

Besarnya nilai rapat daya relatif pada sumbu-*x* dalam bentuk grafik ditampilkan pada Gambar 5.



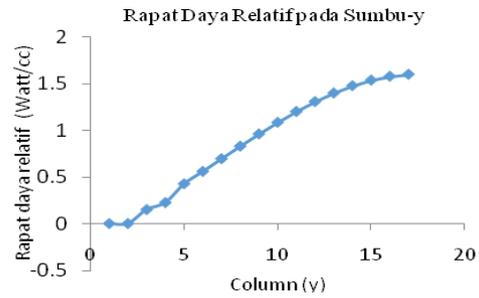
Gambar 5. Rapat daya relatif pada sumbu-x

Penghitungan rapat daya pada CITATION menunjukkan bahwa rapat daya rata-rata pada sumbu-y (*column*) 1 adalah sebesar 3919,593 Watt/cc. Besarnya rapat daya relatif pada sumbu y ditampilkan pada Tabel 6, tampak pada Tabel 6 bahwa nilai rapat daya relatif semakin meningkat pada sumbu y yang semakin mengarah ke dalam yaitu pada bagian bahan bakar. Hal ini disebabkan oleh karena pada bagian bahan bakar merupakan tempat terjadinya reaksi fisi.

Tabel 6. Rapat daya relatif pada sumbu y

y	Rapat daya relatif (Watt/cc)
1	0
2	0
3	0,149294
4	0,2245581
5	0,4248939
6	0,5576671
7	0,6936099
8	0,8279487
9	0,9583818
10	1,082774
11	1,198903
12	1,304445
13	1,397034
14	1,474376
15	1,534404
16	1,575433
17	1,596276

Besarnya nilai rapat daya pada sumbu-y dalam bentuk grafik ditampilkan pada Gambar 6.



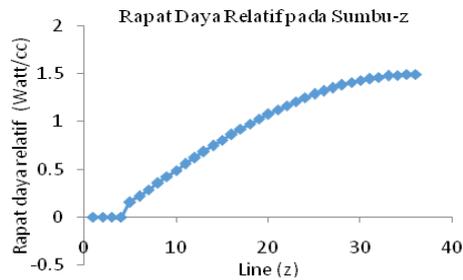
Gambar 6. Rapat daya relatif pada sumbu-y

Penghitungan rapat daya pada CITATION menunjukkan bahwa rapat daya rata-rata pada sumbu-z (*line*) 36 adalah sebesar 417,599 Watt/cc. Besarnya rapat daya relatif pada sumbu z ditampilkan pada Tabel 7, tampak pada Tabel 7 bahwa nilai rapat daya relatif semakin meningkat pada sumbu z yang semakin mengarah ke bagian bahan bakar. Hal ini disebabkan oleh karena pada bagian tersebut merupakan tempat terjadinya reaksi fisi pada bahan bakar.

Tabel 7. Rapat daya relatif pada sumbu z

z	Rapat daya (Watt/cc)	z	Rapat daya (Watt/cc)
1	0	19	1,02653
2	0	20	1,076479
3	0	21	1,124041
4	0	22	1,169119
5	0,1525727	23	1,211619
6	0,2151488	24	1,251456
7	0,2839175	25	1,28855
8	0,3528588	26	1,322823
9	0,4210882	27	1,354207
10	0,4883605	28	1,382638
11	0,5545129	29	1,408061
12	0,6193962	30	1,430423
13	0,6828659	31	1,44968
14	0,7447822	32	1,465794
15	0,8050106	33	1,478733
16	0,8634214	34	1,48847
17	0,9198901	35	1,494985
18	0,9742979	36	1,498268

Besarnya nilai rapat daya relatif pada sumbu-z dalam bentuk grafik ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Rapat daya relatif pada sumbu-z

Desain reaktor SCWR pada penelitian ini setelah dianalisis dengan menggunakan CITATION menghasilkan harga k -efektif sebesar 1,000274. Hal ini menunjukkan bahwa reaktor berada dalam keadaan kritis. Teras reaktor dengan konfigurasi yang telah dijelaskan sebelumnya berada dalam keadaan kritis pada penggunaan bahan bakar yang diperkaya 2,23% untuk posisi *inner fuel* dan 1,5% untuk posisi *outer fuel*. Rapat daya maksimum yang diperoleh pada desain teras reaktor yang telah dibuat adalah sebesar 625,675 Watt/cc.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan penelitian, analisis, dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa Teras reaktor dengan bahan bakar Thorium berada dalam keadaan kritis dengan nilai k -efektif 1,000274. Keadaan kritis teras dicapai pada konfigurasi teras reaktor dengan ukuran lebar (x) 85 cm, panjang (y) 85 cm dan tinggi (z) 180 cm jari 85 cm, pengayaan bahan bakar sebanyak 2,23 % untuk posisi *inner fuel* dan 1,5 % untuk posisi *outer fuel*. Teras reaktor pada penelitian ini dapat menghasilkan daya termal sebesar 1000 MWth, rapat daya maksimal sebesar 625,675 Watt/cc yang terletak pada posisi $x = 17$, $y = 1$ dan $z = 36$ dengan rapat daya rata-rata pada $x = 17$ sebesar 388,961 Watt/cc, $y = 1$ sebesar 391,959 Watt/cc dan pada $z = 36$ sebesar 417,5990 Watt/cc. Desain reaktor pada penelitian ini memenuhi standar keamanan pasif ditinjau dari aspek neutroniknya. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis termal hidrolik. Analisis termal hidrolik ini juga

sangat penting untuk mengetahui proses perpindahan energi termal yang berasal dari reaksi fisi di dalam teras reaktor sampai menjadi energi listrik yang dihasilkan oleh putaran turbin uap.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfa, Teuku. 2005. *Fisika Reaktor- Pelatihan penyelenggaraan Operator dan Supervisor Reaktor TRIGA 2000*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN. Bandung
- Buongiorno, J. 2003. Generation IV R&D Activities For The Development Of The SCWR. *Progress Report for The FY-03 Idaho National Engineering and Environmental Laboratory*. USA
- Carrera, Alejandro nunez, Gilberto Epinosa P, Juan Luis F. 2007. Transient and Stability Analysis of a BWR Core with Thorium-Uranium Fuel. *Journal of Annals of Nuclear Energy*. Volume 35 page 1550-1563.
- Deuderstadt, James J, Louis J. Hamilton. 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Info Nuklir. 2010. Program Energi Nuklir di Indonesia. (online) Tersedia: http://infonuklir.com/readmore/read/nuklir_diindonesia/program_pltn_indonesia/ diakses pada 27 Oktober 2012
- Jeong, Chang Joon, Chang Je Park, Won II Ko. 2008. Dynamic Analysis of a Thorium fuel Cycle in CANDU Reactors. *Journal of Annals of nuclear Energy*. Volume 35 page 1824-1848
- Kidd, Stephen W. 2009. *Nuclear Fuel Resources*. CRC Press. New York.
- Koning, A.J, D. Rochman. 2008. Towards Sustainable Nuclear Energy: Putting Nuclear Physics to Work. *Journal of Annals of Nuclear Energy*. Volume 35 page 2024-2030
- Pramuditya, Syailendra, Abdul Waris. 2005. *Analisis Neutronik, Termal-Hidrolik, dan Termodinamik Pada Perancangan Pressurized Water Reactor*. (online) Tersedia: <http://www.scribd.com/doc/25692769/61/Gambar-4-6-Profil-Power-Density-Aksial>. diakses pada 7 Februari 2012
- Sembiring, Tagor M. 2011. Analisis Model Teras 3-Dimensi untuk Evaluasi Parameter Kriticalitas Reaktor PWR Maju Kelas 1000 MW. *Jurnal Teknologi Nuklir*. Volume 13 page 78-95
- Weinberg, A. 1997. The Proto-history of The molten Salt System. *Journal of Acceleration Plasma Res*. Volume 2 page 23-26
- Zweifel, P.F. 1973. *Reactor Physics*. McGraw-Hill. USA