

## Desain Reaktor Air Superkritis (*Supercritical Cooled Water Reactor*) dengan Menggunakan Bahan Bakar Uranium-thorium Model Teras Silinder

Sri Bawani & Yanti Yulianti

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung,  
Jl. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35144.  
E-mail: sribawani07@gmail.com

Diterima ( 23 Nopember 2015), direvisi ( 2015)

**Abstract.** *The research of design of Supercritical Cooled Water Reactor (SCWR) uranium-thorium fuel cylinder model has been done. The objective of this research is to obtain the design with high thermal power and a criticality. The analyzed parameters were core fuel enrichment, reactor size, criticality, and power density distribution. A core calculation of column (x) and row (y) 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 U-235 and Th-232 as fuel, stainless steel as cladding, light water as moderator and coolant as well. This research obtained critical core design that is size  $x = 340$  cm, and  $y = 170$  cm. The critical condition can be achieved when the fuel first region loaded about 3,1704% fuel enrichment, fuel second region 2,5% fuel enrichment and fuel third region 4% fuel enrichment. The design produced 1000 M W thermal power, the maximum power density is 114,4073 watt/cm<sup>3</sup> and k-effective value is 1,000006.*

**Keywords :** *Core design, SCWR, uranium, thorium, power density*

**Abstrak.** Telah dilakukan penelitian desain reaktor air superkritis (SCWR) dengan bahan bakar uranium-thorium model teras silinder. Reaktor didesain untuk menghasilkan daya termal yang maksimal dan kondisi kritis. Parameter yang dianalisis adalah pengayaan bahan bakar fraksi volume, densitas atom, ukuran teras, kekritisan, dan distribusi rapat daya. Analisis reaktor dilakukan pada 1/6 bagian teras berbentuk silinder dua dimensi (x,y) menggunakan CITATION. Penelitian menggunakan bahan bakar U-235 dan Th-232, stainless steel sebagai selongsong, air ringan sebagai moderator dan pendingin. Diperoleh desain teras reaktor yang ideal dengan ukuran  $x = 340$  cm dan  $y = 170$  cm. Pengayaan pada bagian pertama bahan bakar 3,1704%, bagian kedua 2,5% dan bagian ketiga 4 %. Desain ini menghasilkan daya termal 1000 M Wth, rapat daya maksimal sebesar 114,4073 watt/cm<sup>3</sup> dan nilai k-efektif sebesar 1,000006.

**Kata kunci:** *Desain reaktor, SCWR, uranium, thorium, rapat daya*

---

### PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan zaman dan semakin meningkatnya jumlah penduduk dunia, yaitu sekitar 7 miliar pada tahun 2011 (Worldometers, 2012),

maka peningkatan kebutuhan energi pun tidak dapat dihindarkan lagi. Energi fosil merupakan sumber energi yang paling banyak digunakan di dunia berupa bahan bakar minyak (Frick dan Muliani, 2006).

Zuhal (2010) menyatakan bahwa Indonesia saat ini, masih tergantung terhadap energi fosil, yaitu sekitar 50% dari kebutuhan, terutama energi minyak dan gas bumi. Secara keseluruhan energi dalam negeri 95% masih dipenuhi oleh energi fosil yang tidak terbarukan padahal cadangan energi fosil dalam negeri terbatas. Di sisi lain laju pertumbuhan konsumsi energi cukup tinggi, yaitu 7% per tahun (Zuhal, 2010).

Energi alternatif ada beberapa yang telah dan sedang dikembangkan seperti panas bumi, biomassa, sinar matahari, nuklir, dan sebagainya. Kebanyakan energi alternatif yang dikembangkan merupakan energi terbarukan. Adapun energi yang tidak terbarukan salah satunya adalah nuklir. Meskipun demikian, energi nuklir adalah salah satu energi bersih masa depan karena tidak menghasilkan emisi (Ridwan, 2009).

Energi yang dihasilkan dalam reaksi nuklir dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik atau biasa dikenal sebagai pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Selain uranium, thorium dapat digunakan bahan bakar PLTN (Kidd, 2009).

Pada penelitian ini, desain yang digunakan adalah salah satu reaktor generasi IV, yaitu reaktor air superkritis atau *Supercritical Cooled Water Reactor* (SCWR).

Dalam membuat suatu desain reaktor, diperlukan analisis yang komprehensif. Diantaranya, yaitu penghitungan fraksi volume, densitas atom, pengayaan, besar ukuran baris ( $y$ ) dan konfigurasi teras reaktor yang memenuhi kriteria kekritisitas dan menghasilkan energi secara maksimal. Untuk menganalisis desain teras reaktor, digunakan program komputer yang dapat mensimulasikan perilaku nuklir di teras reaktor yaitu SRAC (*System Reactor Atomic Code*).

## METODE PENELITIAN

Desain teras reaktor dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu penghitungan fraksi volume, densitas atom, pengayaan, besar ukuran baris ( $y$ ) dan konfigurasi teras reaktor, kemudian melakukan penghitungan dengan *CITATION* pada program SRAC.

Penghitungan densitas atom dilakukan pada pengayaan bahan bakar U-235 yang bervariasi jumlahnya pada setiap bagian bahan bakar, yaitu *fuel first region* (bahan bakar bagian pertama), *fuel second region* (bahan bakar bagian kedua) dan *fuel third region* (bahan bakar bagian ketiga). Densitas atom dihitung dengan persamaan berikut (Lewis, 2008).

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

Dimana:

$N$  = densitas atom/molekul (atom/cm<sup>3</sup>)

$\rho$  = massa jenis (gram/cm<sup>3</sup>)

$N_A$  = bilangan avogadro ( $0,602 \times 10^{24}$  molekul/mol)

$M$  = nomor massa (gram/mol)

Ukuran teras reaktor dihitung secara dua dimensi yaitu kolom ( $x$ ) dan baris ( $y$ ). 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**

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bahan bakar U-235 dan Th-232. Meskipun Th-232 tidak bersifat fisil namun tetap dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir. Untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir, Th-232 membutuhkan komponen penggerak untuk memicu terjadinya reaksi fisi yaitu U-235. Th-232 akan menyerap neutron lambat untuk menghasilkan U-235 yang bersifat fisil (Kidd, 2009).

Sebelum melakukan perhitungan dengan CITATION pada SRAC, terlebih dahulu dilakukan penghitungan fraksi volume dan densitas atom untuk digunakan sebagai input CITATION. Densitas atom moderator, selongsong dan bahan bakar ditampilkan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

**Tabel 1.** Densitas atom moderator dan selongsong pada teras reaktor

Nuklida	Moderator (atom/cm <sup>3</sup> ) (x 10 <sup>-2</sup> )	Selongsong (atom/cm <sup>3</sup> ) (x 10 <sup>-2</sup> )
H	5,219106	-
O	2,609553	-
Fe	-	6,091323
Cr	-	1,740378
Ni	-	0,870189

**Tabel 2.** Densitas atom pada pengayaan bahan bakar U-235 bagian pertama

Pengayaan U-235 (%)	Nuklida (atom/cm <sup>3</sup> )		
	Th-232 (x 10 <sup>-2</sup> )	U-235 (x 10 <sup>-4</sup> )	O (x 10 <sup>-2</sup> )
1,0	2,344538	2,368220	4,772187
1,5	2,332697	3,552330	4,772187
2,0	2,320856	4,736440	4,772187
2,5	2,309014	5,920550	4,772187
3,0	2,297173	7,104660	4,772187
3,5	2,285332	8,288770	4,772187
4,0	2,273491	9,472880	4,772187
4,5	2,261650	10,65699	4,772187
5,0	2,249809	11,84110	4,772187

Hasil dari penghitungan fraksi volume dan densitas atom selanjutnya digunakan sebagai input pada CITATION. Komponen bahan bakar yang terdiri dari tiga komposisi yaitu bahan bakar bagian pertama, bahan bakar bagian kedua dan bahan bakar bagian ketiga.

Pengayaan bahan bakar U-235 dilakukan agar reaksi fisi berantai terjadi di dalam teras reaktor. Terjadinya reaksi fisi berantai ditunjukkan oleh faktor multiplikasi (*k*-efektif).

Harga *k*-efektif digunakan sebagai parameter suatu teras reaktor apakah dalam keadaan subkritis, kritis atau superkritis (Zweifel, 1973). Selain itu, penghitungan *k*-efektif dilakukan untuk mengetahui karakteristik neutron di dalam teras reaktor sehingga teras reaktor dapat beroperasi dalam keadaan kritis yaitu dengan nilai *k*-efektif sama dengan satu (*k*=1). Adapun karakteristik SCWR pada penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Karakteristik SCWR

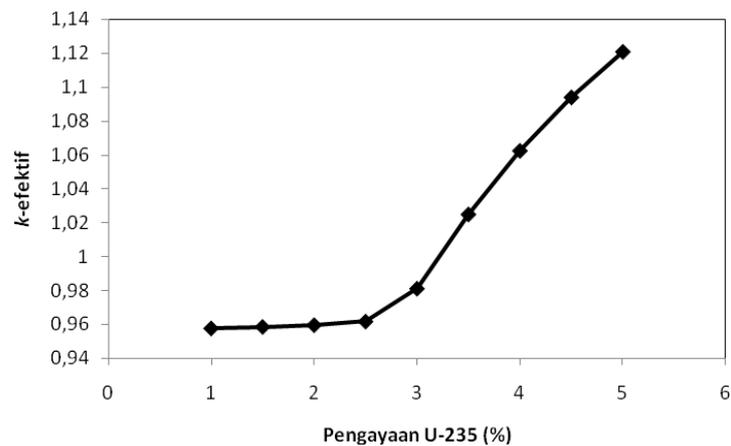
Komponen	Parameter	Nilai
Bahan Bakar (Fuel)	Material	Th-232 dan U-235
	Temperatur	927 °C
	Massa jenis	10,5 gram/cm <sup>3</sup>
Pengayaan	fuel first region	fuel first region (1-5%), fuel second region (1,5-5%) dan fuel third region (1,5-6%)
	Material	stainless steel
Selongsong (Cladding)	Temperatur	600 °C
	Massa jenis	8 gram/cm <sup>3</sup>
	Material	0,78 gram/cm <sup>3</sup>
Moderator	Temperatur	385 °C
	Massa jenis	air ringan (H <sub>2</sub> O)

Setelah dilakukan penghitungan fraksi volume, densitas atom, pengayaan, besar ukuran baris ( $y$ ) dan konfigurasi teras reaktor pada setiap bagian bahan bakar. Diperoleh desain teras reaktor ideal pada pengayaan bahan bakar bagian pertama. Pengayaan bahan bakar pertama dengan nilai  $k$ -efektif ditunjukkan pada **Gambar 1**.

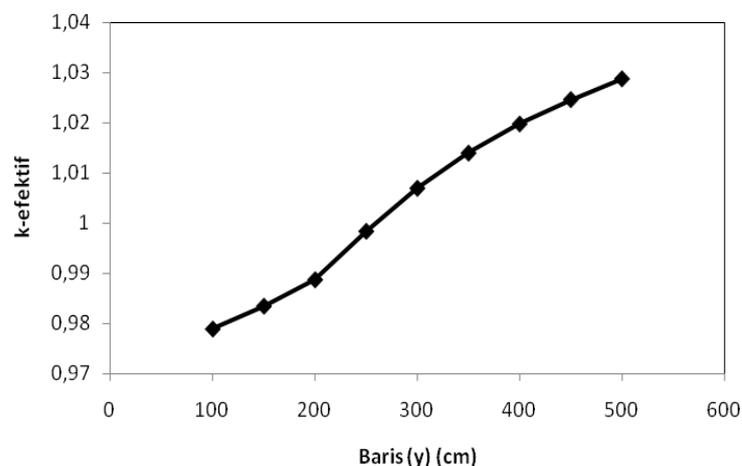
Pada Gambar 1 terlihat bahwa harga  $k$ -efektif yang paling mendekati 1,000 adalah pada komposisi bahan bakar U-235 dengan pengayaan bahan bakar bagian pertama sebesar 3%, bahan bakar bagian kedua sebesar 2,5% dan bahan bakar bagian ketiga sebesar 4%. Hal ini

menunjukkan bahwa pada komposisi tersebut jumlah neutron yang lahir seimbang dengan neutron yang hilang dan reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor telah terkendali.

Semakin tinggi pengayaan bahan bakar maka semakin tinggi kemungkinan terjadinya reaksi atau interaksi nuklir semakin besar pula sehingga jumlah neutron semakin meningkat. Nilai persentase pengayaan bahan bakar U-235 dengan harga  $k$ -efektif mendekati 1, selanjutnya digunakan untuk penghitungan ukuran teras reaktor dengan menggunakan *CITATION*.



**Gambar 1.** Pengaruh pengayaan bahan bakar U-235 terhadap nilai  $k$ -efektif dengan pengayaan bagian pertama 1-5%, pengayaan bagian kedua 2,5% dan pengayaan bagian ketiga 4%



**Gambar 2.** Pengaruh besar ukuran baris ( $y$ ) teras reaktor terhadap nilai  $k$ -efektif dengan besar ukuran baris ( $y$ ) 100-500 cm, pengayaan bagian pertama 3%, pengayaan bagian kedua 2,5% dan pengayaan bagian ketiga 4%

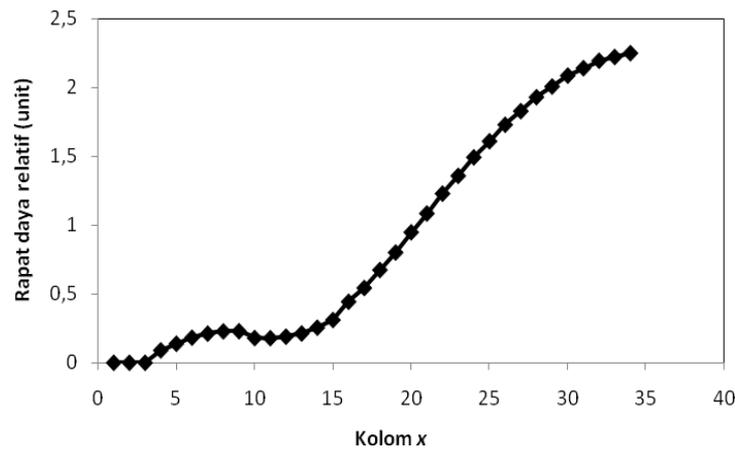
Pada penelitian ini ukuran teras reaktor baris ( $y$ ) divariasikan ukurannya yaitu mulai dari 100-500 cm sedangkan ukuran kolom ( $x$ ) tidak berubah yaitu 340 cm. Hal ini digunakan untuk melihat kecenderungan harga  $k$ -efektif terhadap besar ukuran baris ( $y$ ) teras reaktor. Besarnya ukuran baris ( $y$ ) teras reaktor yang divariasikan ditampilkan dalam **Gambar 2**.

Semakin besar ukuran baris ( $y$ ) teras reaktor maka nilai  $k$ -efektif semakin besar pula karena reaksi fisi yang terjadi semakin banyak sehingga jumlah neutronnya yang lahir terus bertambah. Berdasarkan penghitungan dengan *CITATION* diperoleh besarnya rapat daya

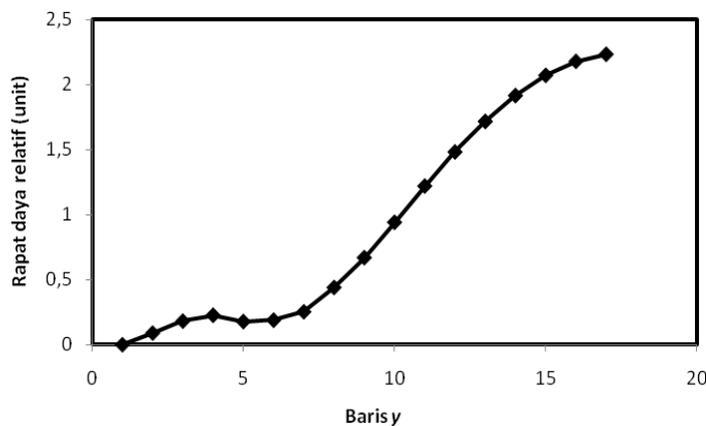
relatif pada kolom ( $x$ ) ditampilkan pada **Gambar 3**. Sedangkan besar rapat daya relatif pada baris ( $y$ ) ditampilkan pada **Gambar 4**.

Tampak pada **Gambar 3** dan **Gambar 4** bahwa nilai rapat daya relatif semakin meningkat pada kolom ( $x$ ) dan baris ( $y$ ) yang semakin mengarah ke dalam yaitu pada bagian bahan bakar. Hal ini disebabkan pada bagian bahan bakar merupakan tempat terjadinya reaksi fisi.

Karakteristik dari teras reaktor yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada **Tabel 4**.



**Gambar 3.** Rapat daya relatif pada kolom ( $x$ ) dengan jumlah *mesh* 34, pengayaan bagian pertama 3,1704%, pengayaan bagian kedua 2,5% dan pengayaan bagian ketiga 4%

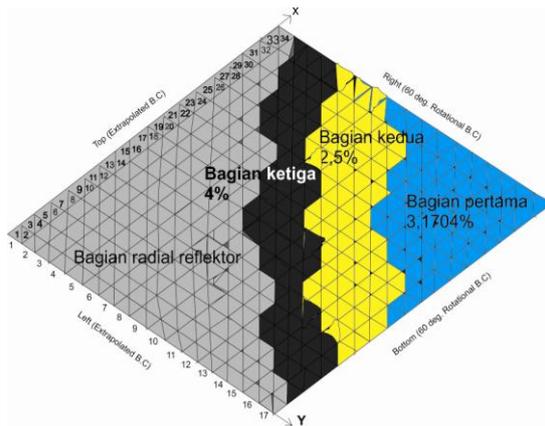


**Gambar 4.** Rapat daya relatif pada baris ( $y$ ) dengan jumlah *mesh* 17, pengayaan bagian pertama 3,1704%, pengayaan bagian kedua 2,5% dan pengayaan bagian ketiga 4%

Sri Bawani dkk: Desain Reaktor Air Superkritis (*Supercritical Cooled Water Reactor*) dengan Menggunakan Bahan Bakar Uranium-Thorium Model Teras Silinder

**Tabel 4.** Karakteristik teras SCWR

Parameter	Nilai
Daya termal	1000 M Wth
Kolom ( $x$ )	340 cm
Baris ( $y$ )	170 cm
Jumlah <i>mesh</i>	34 x 17
Pendingin	Air ringan ( $H_2O$ )
Suhu pendingin	385 <sup>0</sup> C
Tekanan sistem	25 M Pa



**Gambar 5.** Desain geometri teras reaktor model silinder 2-D dengan *mesh* 34 x 17 berbentuk triangular

Keterangan:

- ▲ Bahan bakar bagian pertama
- ▲ Bahan bakar bagian pertama
- ▲ Bahan bakar bagian pertama
- ▲ Radial reflektor

Karakteristik teras SCWR pada **Tabel 4** di atas digunakan sebagai input. Desain geometri teras reaktor model silinder 2-D dengan *mesh* 34 x 17 berbentuk triangular ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Penelitian ini dilakukan penghitungan pada 1/6 bagian teras reaktor dengan jumlah *mesh* 34 x 17 dan bentuknya triangular dengan ukuran setiap *mesh* adalah 10 cm pada semua arah.

Setelah dilakukan penghitungan dengan *CITATION*, teras reaktor dengan konfigurasi tersebut mengalami keadaan kritis. Keadaan kritis ditunjukkan ketika pengayaan bahan bakar U-235 bagian pertama sebesar 3,1704%, bagian kedua sebesar 2,5%, bagian ketiga sebesar 4%, dan ukuran baris ( $y$ ) teras 170 cm ditunjukkan harga  $k$ -efektif sebesar 1,000006.

Selain kriteria kekritisian 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).

Penghitungan rapat daya pada *CITATION* menunjukkan bahwa rapat daya rata-rata pada kolom ( $x$ ) 34 adalah 51,18537 watt/cm<sup>3</sup> dengan faktor puncak (*peak factor*) daya 2,251048.

Penghitungan rapat daya pada *CITATION* menunjukkan bahwa rapat daya rata-rata pada baris ( $y$ ) 17 adalah 50,82404 watt/cm<sup>3</sup> dengan faktor puncak daya 2,235157. Rapat daya maksimal sebesar 114,4073 watt/cm<sup>3</sup> yang terletak pada titik  $x = 34$  dan  $y = 17$ .

## KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah teras reaktor SCWR model teras silinder mengalami kondisi kritis sebesar 1,000006 pada pengayaan bahan bakar U-235 bagian pertama 3,1704%, bagian kedua 2,5% dan bagian ketiga 4%. Konfigurasi teras reaktor yang menghasilkan kondisi teras raktor kritis adalah ukuran kolom ( $x$ ) 340 cm dan baris ( $y$ ) 170 cm. Teras reaktor menghasilkan daya termal sebesar 1000 M Wth. Teras reaktor menghasilkan nilai rapat daya maksimal sebesar 114,4073 watt/cm<sup>3</sup> yang terletak pada titik  $x = 34$  dan  $y = 17$ . Rapat daya rata-rata pada

kolom (x) 34 adalah 51,18537 watt/cm<sup>3</sup> dengan faktor puncak (*peak*) daya 2,251048. Rapat daya rata-rata pada baris (y) 17 adalah 50,82404 watt/cm<sup>3</sup> dengan faktor puncak daya 2,235157.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Alfa, Teuku. 2015. *Fisika Reaktor-Pelatihan Penyelenggaraan Operator dan Supervisor Reaktor TRIGA 2000*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN. Bandung.
- Kidd, Stephen W. 2009. *Nuclear Fuel Resources*. New York: CRC Press. Page 85.
- Frick, Heinz dan Muliani, Hesti. 2006. *Arsitektur Ekologis*. Kanikuis. Yogyakarta. Page 161.
- Ridwan, Nyiak. 2009. *The Extreme Future, 10 Tren Utama yang membentuk Ulang 20 Tahun Kedepan*. Tangerang. Page 43.
- Worldometer, 2012. <http://www.worldometers.info/world-population/>. *World Population: Past, Present, and Future*. Diakses pada tanggal 27 Juni 2015 pukul 11.00 WIB
- Zuhal. 2010. *Knowledge Platform Kekuatan Daya Saing dan Innovation*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. Page 203
- Zweifel, P. F.1973. *Reactor Physics*.USA: McGraw-Hill. Page 74.

Sri Bawani dkk: Desain Reaktor Air Superkritis (*Supercritical Cooled Water Reactor*) dengan Menggunakan Bahan Bakar Uranium-Thorium Model Teras Silinder