

STUDI PARAMETER REAKTOR BERBAHAN BAKAR UO₂ DENGAN MODERATOR H₂O DAN PENDINGIN H₂O

Very Richardina^{1*}, Wahyu Setia Budi¹ dan Tri Wulan Tjiptono²

¹Jurusan Fisika, Universitas Diponegoro, Semarang

²Badan Tenaga Atom Nasional Yogyakarta

*Korespondensi penulis, E-mail: veryrichardina@undip.ac.id

Abstract

Research about study of Pressurized Water Reactor (PWR) parameters using UO₂ as fuel materials with moderator of H₂O and coolant of H₂O for heterogeneous infinite cylinder design has realized. There is one of design to make nuclear reactor, it is a neutronic design. At neutronic design, first must calculations to determine group constants (neutron cross section and the multiplication factor). The neutronic equations with one dimensional transport theory for annulus geometry can be solved with WIMSD5B codes. Numeric method that used was one dimensional homogenization cell methods. To achieve steady state or reactor, used enrichment of U²³⁵ between 2% until 3,2% with variation 0,05%. From the result with cluster methods with 32 groups and 10 regions, steady states of reactor at enrichment of U²³⁵ is 2,9% with effective multiplication factor (k_{eff}) = 1,006491.

Keywords: PWR, reactor parameters, effective multiplication factor (k_{eff}), WIMSD5B

Abstrak

Telah dilakukan penelitian tentang studi parameter reaktor PWR berbahan bakar UO₂ dengan moderator H₂O dan pendingin H₂O untuk desain reaktor heterogen berbentuk silinder tak berhingga. Terdapat salah satu desain untuk membuat reaktor nuklir, yaitu desain netronik. Pada desain netronik pertama kali harus menghitung konstanta group (tampang lintang neutron dan faktor perlipatan efektif neutron). Persamaan netronik dengan teori transport satu dimensi untuk geometri annulus dapat diselesaikan dengan paket program WIMSD5B. Metode numeris yang digunakan adalah metode homogenisasi sel satu dimensi. Untuk memperoleh kondisi kritis reaktor digunakan pengayaan fraksi U²³⁵ sebesar 2% sampai dengan 3,2% dengan variasi 0,05%. Dari hasil penelitian dengan metode cluster dengan 32 grup dan 10 daerah diperoleh kondisi kritis reaktor pada pengayaan fraksi U²³⁵ sebesar 2,9% dengan nilai k_{eff} = 1,006491.

Kata kunci: reaktor PWR, parameter reaktor, faktor multiplikasi efektif neutron (k_{eff}), WIMSD5B

Pendahuluan

Dewasa ini perkembangan nuklir semakin pesat dalam berbagai aspek kehidupan, salah satunya pendaayagunaan teknologi nuklir dalam bidang energi yang saat ini sudah berkembang secara besar-besaran yaitu dalam bentuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). PLTN merupakan salah satu solusi yang tepat untuk mengatasi krisis ekonomi di Indonesia. Selain bersih, harga listriknya

sangat murah dan tidak mencemari lingkungan[1].

Pada PLTN, tenaga yang dibangkitkan berasal dari salah satu reaksi inti yang terkenal dengan sebutan reaksi fisi[2]. Reaksi fisi merupakan reaksi yang terjadi pada inti berat dan akan meluruh atau pecah menjadi inti-inti ringan secara berantai[3]. Pada reaksi tersebut dilakukan dengan cara menembaki sasaran (inti-inti fisil) dengan memakai neutron, sehingga menghasilkan inti baru yang tidak stabil,

untuk menjadi stabil inti-inti tersebut akan meluruh dengan memancarkan radiasi[4].

Salah satu reaktor fisi yang banyak dipakai di dunia adalah jenis PWR (*Pressurized Water Reactor*), pada PWR, air ringan digunakan sebagai pendingin dan medium pelambat neutron (moderator neutron). PWR menggunakan air yang bertekanan tinggi untuk mengambil panas dari reaktornya. Tekanan tinggi ini diperlukan agar dalam pemindahan panas dari teras reaktor air tersebut tidak mendidih. Pada PWR bahan bakar Uranium dioksida (UO_2) dalam bejana reaktor (*reactor vessel*) dipakai untuk memanaskan air pendingin primer bertekanan tinggi dengan alat pengendali tekanan (*pressurizer*) untuk mempertahankan tekanannya. Di dalam sistem primer tidak diperbolehkan terjadi pendidihan, karena itu sistem dibuat bertekanan tinggi. Air pendingin primer selanjutnya dialirkan ke sistem pembangkit uap (*steam generator*) untuk memproses pertukaran panas dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder, pertukaran panas ini menyebabkan air sistem pendingin sekunder mendidih dan menghasilkan uap yang selanjutnya dipakai untuk memutar turbin dan generator untuk menghasilkan tenaga listrik[5].

Pada umumnya bahan bakar yang digunakan reaktor jenis PWR adalah U^{235} dengan tingkat pengayaan 2% sampai dengan 3% sebagai bahan bakar dalam bentuk persenyawaan Uranium dioksida (UO_2).

Dengan latar belakang tersebut, maka perlu dipelajari parameter-parameter apa saja yang berkaitan dengan rancang bangun reaktor nuklir guna menghasilkan kondisi paling optimal dari kinerja reaktor nuklir. Salah satu parameter yang dapat ditentukan melalui paket program WIMSD5B adalah faktor penggandaan efektif neutron.

Hal utama dari kebanyakan model perhitungan reaktor nuklir adalah perhitungan untuk menganalisis sifat

neutronik di dalam teras reaktor. Perhitungan yang digunakan biasanya berdasarkan pemecahan persamaan transport dan difusi banyak kelompok untuk harga k_{eff} dan fluks neutron, yang selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan besarnya distribusi daya reaktor.

Persamaan Transport Neutron

Jumlah neutron di dalam volume sembarang V dengan rentang energi antara E sampai E+dE, dan arah gerak dari $\hat{\Omega}$ sampai $\hat{\Omega} + d\hat{\Omega}$ dapat dinyatakan dalam persamaan (1):

$$\left[\int_V n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dEd\hat{\Omega} \quad (1)$$

Laju perubahan jumlah neutron terhadap waktu dinyatakan dalam persamaan 2:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_V n(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) d^3r \right] dEd\hat{\Omega} \\ = \left[\int_V \frac{\partial n}{\partial t} d^3r \right] dEd \dots \dots (2) \end{aligned}$$

Persamaan (2) merupakan persamaan transport neutron yang relatif sulit penyelesaiannya, sehingga digunakan pendekatan yang paling sederhana terhadap teori transport disebut teori difusi. WIMSD5B merupakan salah satu paket program komputer yang berbasis persamaan transport neutron.

Persamaan Difusi Neutron

Persamaan difusi merupakan suatu bentuk pendekatan yang paling sederhana terhadap teori transport. Solusi dari persamaan difusi ini memberikan bentuk distribusi fluks neutron terhadap ruang dan selanjutnya dapat diperoleh bentuk distribusi daya yang bergantung pada ruang. Pada persamaan ini energi neutron diasumsikan memiliki grup-grup energi

sehingga persamaan ini disebut persamaan difusi multigrup.

Persamaan keseimbangan jumlah neutron:

$$\begin{bmatrix} \text{laju perubahan} \\ \text{jumlah} \\ \text{neutron} \\ \text{digroup } g \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \text{kebocoran} \\ \text{neutron} \\ \text{dari sistem} \\ \text{(leakage)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{absorpsi} \\ \text{neutron} \\ \text{di} \\ \text{group } g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{neutron muncul} \\ \text{dari sumber} \\ \text{neutron di} \\ \text{group } g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{neutron} \\ \text{terhambur} \\ \text{keluar dari} \\ \text{group } g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{neutron} \\ \text{terhambur} \\ \text{masuk ke} \\ \text{group } g \end{bmatrix}$$

Gambar 1. Persamaan keseimbangan jumlah Neutron[6].

Dengan indeks-g merupakan indeks grup 1,2,...g dimulai dari grup neutron yang mempunyai energi tertinggi sampai ke grup neutron dengan energi terendah. Tanda minus (-) menunjukkan jumlah neutron berkurang dan tanda plus (+) menunjukkan jumlah neutron yang bertambah.

Konsep keseimbangan pada Gambar 2 secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \Sigma_{ag} + S_g - \Sigma_{sg} \phi_g + \Sigma_{g'} \Sigma_{sg'g} \phi_{g'} \quad (3)$$

dengan suku sumber neutron,

$$S_g = \frac{\chi_g}{k_{eff}} \Sigma_{g'} v_{g'} \Sigma_{fg'} \quad (4)$$

perubahan neutron yang hilang karena absorpsi maupun hamburan dapat digabung jadi suku removal yaitu dapat ditulis pada persamaan (5):

$$\Sigma_{Rg} \phi_g = \Sigma_{ag} \phi_g + \Sigma_{sg} \phi_{g'} \quad (5)$$

dalam keadaan tunak (*steady state*) :

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

sehingga persamaan difusi multigroup dapat ditulis pada persamaan sebagai berikut,

$$\nabla \cdot D_g \nabla \phi_g + \Sigma_{Rg} \phi_g = \frac{\chi_g}{k_{eff}} \Sigma_{g'} v_{g'} \Sigma_{fg'} \phi_{g'} + \Sigma_{g'} \Sigma_{sg'g} \phi_{g'} \quad (7)$$

Solusi untuk persamaan difusi dua grup masih bisa dilakukan secara analitik,

tetapi untuk persamaan yang lebih dari dua grup diperlukan penyelesaian secara numerik.

Faktor Multiplikasi Neutron

Di dalam teras reaktor terjadi reaksi berantai yang mengakibatkan neutron dalam jumlah tertentu. Faktor multiplikasi k, dalam reaktor nuklir didefinisikan sebagai perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan dalam suatu generasi dibagi dengan jumlah neutron yang dihasilkan pada generasi sebelumnya. Harga faktor multiplikasi tersebut dapat digunakan sebagai parameter suatu teras reaktor apakah dalam keadaan subkritis, kritis atau superkritis.

Jika teras reaktor dianggap tak berhingga perubahan jumlah neutron akibat reaksi berantai biasa disebut dengan faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) dan tidak memperhitungkan mengenai kebocoran reaktor. Faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) juga biasa dikenal sebagai empat faktor formula dan dapat dituliskan pada persamaan (9)[7],

$$k_{inf} = \epsilon p f \eta \quad (9)$$

Dengan,

- k_{inf} : Faktor multiplikasi tak hingga
- ϵ : Faktor fisi cepat
- p : Probabilitas tangkapan resonansi
- f : Faktor pemanfaatan termal
- η : Faktor reproduksi

Jika kebocoran neutron diperhitungkan pada reaktor berhingga, maka faktor multiplikasi yang memperhitungkan kebocoran disebut faktor multiplikasi efektif (k_{eff}).

Faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) biasa disebut dengan faktor enam formula. Perhitungan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) adalah sebagai berikut,

$$k_{eff} = k_{inf} P_{FNL} P_{TNL} \quad (10)$$

Dengan P_{FNL} adalah kemungkinan neutron cepat tidak bocor dan P_{TNL} adalah kemungkinan neutron termal tidak bocor.

Metode Penelitian

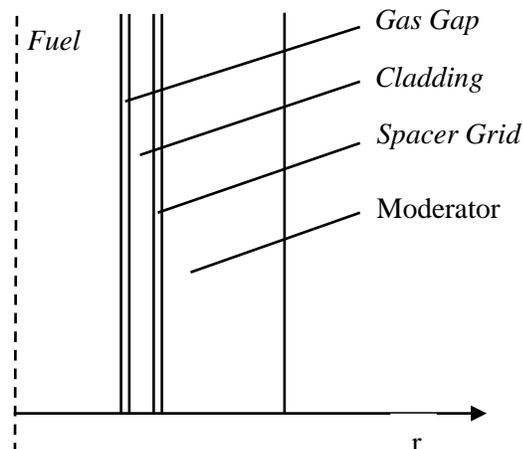
Penelitian ini dilakukan untuk mencari parameter reaktor nuklir PWR berbahan bakar UO_2 dengan moderator H_2O dan pendingin H_2O untuk reaktor silinder tak hingga sampai dengan kondisi kritis reaktor yaitu nilai $k_{eff} = 1$ dengan menggunakan paket program WIMSD5B sesuai dengan persamaan difusi multigroup dengan memvariasi jumlah pengayaan dengan memvariasi jumlah pengayaan fraksi U^{235} dalam bahan bakar sebesar 2% sampai dengan 3,2% dengan interval 0,05%.

Metode yang digunakan adalah homogenisasi sel satu dimensi, diasumsikan sel memiliki panjang tak hingga dengan tinggi dan tebal sel tetap, serta memiliki geometri berbentuk annulus. Setiap sel merupakan representasi dari elemen-elemen penyusun teras reaktor[8]. Dimensi yang digunakan dalam input program merupakan dimensi dari reaktor Almaraz II. Dimensi kritis dalam sel bahan bakar (*fuel bundle*) reaktor dapat dilihat pada Tabel 1.

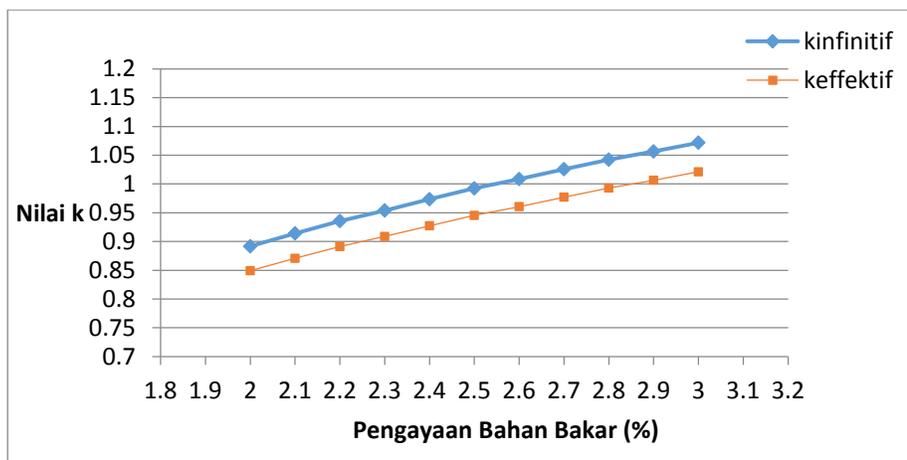
Tabel 1. Dimensi Kritis Sel Bahan Bakar (*Fuel Bundle*)[9]

Parameter Reaktor	Jejari Terluar (cm)
Bahan Bakar (UO_2)	0.410713
<i>Gas Gap</i> (He)	0.418488
Kelongsong (Zr)	0.475669
<i>Spacer Grid</i>	0.477579
Moderator dan pendingin (H_2O)	1.992472

Desain reaktor ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Fuel Rod Unit Cell Geometry Model



Gambar 3. Pengaruh pengayaan bahan bakar terhadap k_{inf} dan k_{eff}

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan perhitungan faktor multiplikasi dengan variasi pengayaan bahan bakar sebesar 2% sampai dengan 3,2% dengan menggunakan program WIMSD5B diperoleh hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Reaktor dikatakan berada dalam kondisi kritis jika nilai k_{eff} sama dengan 1. Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin besar jumlah pengayaan bahan bakar, maka nilai k_{inf} dan k_{eff} akan semakin besar pula.

Hal ini disebabkan karena semakin besar jumlah pengayaan UO_2 akan menyebabkan semakin besar pula fraksi bahan bakar. Semakin besar fraksi bahan bakar maka semakin banyak pula *fission product* yang terbentuk. Berdasarkan persamaan (10), perubahan η hanya karena perubahan pengayaan U^{235} . Peningkatan η karena lebih sedikit U^{238} pada reaktor membuat lebih banyak neutron yang diserap oleh U^{235} dan menyebabkan fisi. Hal ini juga berarti bahwa laju absorpsi oleh bahan bakar akan bertambah sehingga jumlah neutron fisi yang dihasilkan juga akan bertambah dan nilai k_{inf} dan k_{eff} akan bertambah pula. Nilai k_{inf} selalu lebih besar dari k_{eff} , hal ini disebabkan karena untuk nilai k_{inf} diasumsikan bahwa tidak ada kebocoran neutron pada reaktor. Sedangkan pada k_{eff} sudah diperhitungkan adanya kebocoran neutron pada reaktor.

Berdasarkan Gambar 3. terlihat bahwa nilai k_{inf} sama dengan 1,003751 ketika bahan bakar diperkaya sebesar 2,65% dan kondisi paling optimum (kondisi kritis) reaktor diperoleh ketika nilai k_{eff} sama dengan 1,006491, yaitu ketika bahan bakar diperkaya sebesar 2,9%.

Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa kondisi paling optimum (kondisi kritis) reaktor diperoleh ketika bahan bakar diperkaya sebesar 2,9% dengan nilai k_{eff} sebesar 1,006491. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis terhadap distribusi daya reaktor serta analisis termal hidrolik pada desain reaktor.

Daftar Pustaka

- [1] Soenarmo. *Nuklir, Pembangkit Listrik Nuklir*. Ekonomis. www.pikiranrakyat.com.
- [2] Suropto, Asmedi. 1985. *Daur Bahan Bakar*. Yogyakarta : BATAN
- [3] Soetjipto dan Mosik. 2004. *Konsep Dasar Fisika Modern*. Semarang: IKIP Semarang Press.
- [4] Wardhana, W.A. 1994. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: Andi Offset.
- [5] Batan, *Pengenalan PLTN*. www.batan.go.id.
- [6] Pramuditya, Syeilendra. 2007. *Pengembangan Kode Komputer Terintegrasi untuk Studi Desain Awal PLTN Jenis PWR*. Tesis Program Studi Fisika, Institut Teknologi Bandung
- [7] Glasstone, S. 1952. *The Element of Nuclear Reactor Theory*. New York: D. Van Norstrand Company, Inc.
- [8] Kamajaya, K. dkk. 2004. *Penentuan Konstanta Kelompok Reaktor Triga Mark II Bandung dengan Program WIMS*. www.batan.go.id.
- [9] Fuzaeatun. 2007. *Penentuan Distribusi Daya Reaktor PLTN dengan Bahan Bakar Dimuati Thorium*, Skripsi S1 Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang.

