

ARTIKEL RISET

Perhitungan Burn Up pada Reaktor HCLWR Model Geometri Kotak Tiga Dimensi dengan Bahan Bakar Thorium Menggunakan Kode COREBN

Hasni Handayani, Yanti Yulianti* and Posman Manurung

Received: 22 June, 2020 | Accepted: 22 July, 2020 | Published: 17 Aug., 2020 | DOI: 10.22146/jfi.v24i2.57167

Ringkasan

Penelitian tentang perhitungan *burn up* pada reaktor HCLWR model geometri kotak tiga dimensi dengan bahan bakar thorium menggunakan kode COREBN telah dilakukan. Perhitungan dilakukan dengan simulasi komputasi menggunakan kode COREBN pada program *System Reactor Atomic Code* (SRAC). Hal-hal yang dilakukan pada penelitian untuk memperoleh rasio konversi (CR) dan faktor multiplikasi (k_{eff}) yang diinginkan dengan cara memvariasikan persentase pengayaan, periode burn up, total power, dan konfigurasi. Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, maka diperoleh semakin besar persentase pengayaan pada U^{233} , nilai keff akan semakin meningkat. Persentase yang optimal pada pengayaan bahan bakar U_1 1% dan U_3 4%. Semakin lama periode burn up (385-405 hari) dan besar total power (244-247 MWt), maka nilai k_{eff} akan menurun dan nilai CR meningkat. Perubahan konfigurasi diperoleh rapat daya maksimum 336,0367 Watt/cm³ dan nilai rapat daya yang konstan pada kolom x baris y, dan z. Desain reaktor yang dapat menghasilkan nilai CR 1 dengan k_{eff} dapat membuat reaktor menyala hingga akhir yaitu ketika pengayaan bahan bakar U_1 1% dan U_3 3%, periode 150 hari dan fraksi volume 45,0% bahan bakar, 11,3% selongsong, 43,7% moderator.

Kata Kunci : *burn up*; HCLWR; thorium; CR; k_{eff}

Abstract

Research on the calculation of burn-up in the HCLWR reactor three-dimensional square geometry model with thorium fuel using COREBN code has been carried out. Calculations were performed with a computational simulation using the COREBN code in the System Reactor Atomic Code (SRAC) program. To get critical conversion ratio and multiplication factor (k_{eff}) were varied the percentage of enrichment, increasing the burn up period, varied the total power, and the configuration. Based on the result of research and analysis that has been done, the percentage of enrichment in U^{233} were obtained the value of keff will increase. The optimal percentage is the enrichment of fuel U_1 1% and U_3 4%. The longer the burnup period (385-405 days) and the total power (244-247 MWt), the k_{eff} value will decrease and the CR value increases. Changes in the migration obtained a maximum power density of 336.0367 Watt/cm³ and a constant value of the power density in columns x rows y, and z. The design of the reactor that can produce a CR value of 1 with a k_{eff} can make the reactor turn on until the end, namely when the enrichment of fuel U_1 1% and U_3 3%, a period of 150 days and a volume fraction of 45,0% fuel, 11,3% cladding, 43,7% moderator.

Keywords: Burn up; HCLWR; Thorium; CR; k_{eff}

PENDAHULUAN

Reaktor menurut arti sesungguhnya adalah tempat berlangsungnya reaksi. Reaktor nuklir adalah tempat berlangsungnya reaksi nuklir, digunakan untuk

*Correspondence: yanti.yulianti@fmipa.unila.ac.id

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Lampung, 35141, Bandar Lampung, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

†Equal contributor

membuat, mengatur dan menjaga kesinambungan reaksi nuklir berantai pada laju yang tetap. Awalnya, reaktor nuklir pertama digunakan untuk memproduksi plutonium sebagai senjata nuklir. Reaktor nuklir sudah banyak digunakan baik di negara-negara maju maupun berkembang. Reaktor yang beroperasi di dunia sebagian besar digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik (PLTN) seperti Amerika Serikat (99), Perancis(58), Jepang(43) dan negara lainnya. Reaktor nuklir membutuhkan pendingin untuk mencegah agar tidak terjadi akumulasi panas yang berlebihan pada inti reaktor. Ada banyak macam pendingin yang digunakan misalnya air ringan, air berat, gas, garam cair (*molten salt*), logam cair (*liquid metal*) dan lain-lain. *Light Water Reactor* (LWR) adalah reaktor nuklir termal yang menggunakan air ringan (H_2O) sebagai moderator dan sekaligus berfungsi sebagai pendingin [1].

Salah satu reaktor fisi yang dipakai untuk pembangkit listrik adalah konversi tinggi reaktor air ringan atau *High Conversion Light Water Reactor* (HCLWR). HCLWR yang diharapkan dapat meningkatkan pemanfaatan bahan bakar dengan hanya sedikit perubahan dalam teknologi reaktor air ringan atau LWR yang ada. Fitur utama HCLWR terdiri dari kesamaannya dengan LWR saat ini, bila dibandingkan dengan jenis reaktor konversi lainnya. HCLWR memiliki dua fitur desain yaitu mengurangi rasio volume air terhadap bahan bakar dan pengayaan fisil (nuklida yang mengalami pembelahan inti secara spontan bila diradiasi dengan neutron) yang lebih tinggi [2]. Uranium dioksida merupakan bahan bakar utama untuk reaktor jenis LWR. Di alam, uranium memiliki tiga isotop yaitu ${}_{92}U^{234}$, ${}_{92}U^{235}$ dan ${}_{92}U^{238}$ masing-masing sebanyak 0,0056%, 0,718% dan 99,276% [3].

Burn up atau derajat bahan bakar didefinisikan sebagai total energi yang dilepaskan per unit massa bahan bakar sebagai hasil pembakaran bahan bakar. Satuan yang digunakan megawatt days per ton (MWd/t) bahan bakar [4]. Pada sistem SRAC, proses perhitungan burn up teras dilakukan dalam 2 tahapan. Pada tahap pertama dilakukan perhitungan burn up pada tingkat sel. Pada tahap ini akan didapat data tampang lintang makroskopik tiap step burn up dari sel yang terhomogenisasi. Data tampang lintang makroskopik hasil perhitungan burn up tingkat sel berupa tabulasi tampang lintang terhadap suhu teras, suhu pendingin, dan tingkat burn up pada pemodelan perangkat bahan bakar yang disimpan dalam file MACRO. Data tampang lintang makroskopik ini kemudian akan diinterpolasi untuk menghitung burn up teras pada tahap kedua [5].

Geometri 3 dimensi pada reaktor ada 4 jenis yaitu kotak (X-Y-Z), lingkaran (θ -R-Z), hexagonal

(XH-YH-Z), dan triangular (XT-YT-Z) [6]. Perhitungan pada teras reaktor dilakukan secara 3 dimensi geometri kotak pada seluruh bagian. Sehingga diperoleh rapat daya relatif kolom x, baris y dan arah z. Pada penelitian juga menggunakan bahan bakar thorium.

Selain uranium bahan bakar reaktor adalah thorium. Thorium adalah material fertil (nuklida yang dapat menyerap sebuah neutron untuk membentuk material fisil) yang sumber dayanya dalam kerak bumi telah diprediksi mencapai 3 kali lebih banyak dari pada uranium. Penggunaan bahan bakar thorium juga akan mengurangi jumlah limbah radioaktif (lebih sedikit dari pada limbah radioaktif uranium). Melalui serangkaian reaksi, thorium alam (${}_{90}Th^{232}$) dapat menghasilkan bahan bakar fisil ${}_{92}U^{233}$, sehingga memiliki potensi sebagai bahan bakar sebuah reaktor nuklir [7].

System Reactor Atomic Code (SRAC) adalah program yang digunakan sebagai sistem kode neutronik untuk mensimulasikan perilaku nuklir di dalam teras reaktor. Sistem yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) pada tahun 1978 ini dapat membantu dalam mendesain dan menganalisis reaktor khususnya reaktor termal [5]. SRAC memiliki kode dasar yang terdiri dari beberapa modul kode perhitungan. Salah satunya adalah COREBN (modul perhitungan *burn up* teras) [5].

Analisis pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan program COREBN. Di dalam sistem SRAC, proses perhitungan pembakaran inti dibagi menjadi dua tahap. Pertama, perhitungan *Burn-up* sel dengan SRAC yang menghasilkan beberapa grup penampang lintang makroskopik yang homogen setiap tahap *Burn-up*. Kedua, dilanjutkan dengan perhitungan *Burn-up* inti dengan COREBN, fungsi COREBN adalah membaca informasi dari riwayat file seperti inti geometri, posisi pemuatan elemen bahan bakar/non bahan bakar dan tingkat pembakaran setiap elemen bahan bakar. Fungsi selanjutnya adalah persiapan penampang lintang makroskopik oleh interpolasi pada tingkat pembakaran, melakukan perhitungan difusi distribusi daya dan pembaruan distribusi *Burn-up*. Program COREBN memiliki tiga macam geometri yaitu satu dimensi, dua dimensi dan tiga dimensi. Geometri tiga dimensi kotak (X-Y-Z) menggunakan dua bahan bakar yang berbeda pengayaan, dengan pengayaan yang lebih besar berada di luar dan yang kecil di dalam [6].

Penelitian yang telah menggunakan COREBN dilakukan oleh [8] dalam penelitian digunakan bahan bakar *Mixed Oxide Fuel* (MOX) dan reaktor *Pressuried Water Reactor* (PWR) Integral serta

menggunakan studi mengenai SRAC dan COREBN yang digunakan sebagai simulator. Hasil yang diperoleh desain inti PWR Integral yang paling optimum adalah inti dengan rasio PuO₂ dalam MOX 12% yaitu periode kekritisan inti reaktor yang mencapai 1521 hari dengan nilai Conversion Ratio (CR) paling rendah adalah 0,0622004. Perubahan CR yang terjadi tidak signifikan apabila menggunakan bahan bakar UO₂.

Pada penelitian ini akan dilakukan perubahan pada pengayaan, periode dan daya termal. Bahan bakar yang digunakan adalah thorium sedangkan geometri yang digunakan adalah kotak tiga dimensi (X-Y-Z) pada reaktor HCLWR. Hasil yang dianalisis yaitu faktor multiplikasi (k_{eff}), CR dan rapat daya relatif. Analisis dilakukan dengan menggunakan SRAC kemudian dilanjutkan dengan COREBN yang dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) di Japan Atomic Energy Agency (JAEA) Jepang.

Tujuan pada penelitian ini meliputi, mengetahui pengaruh pengayaan bahan bakar terhadap keff yang dihasilkan, pengaruh periode dan variasi daya termal reaktor terhadap nilai rasio konversi dan k_{eff} pada reaktor HCLWR model geometri kotak tiga dimensi, hasil densitas daya maksimum dan densitas daya rata-rata pada *burn up* reaktor HCLWR model geometri kotak tiga dimensi?

METODE PENELITIAN

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah seperangkat personal komputer dengan *Operating System* (OS) Linux Mint dan program SRAC – COREBN.

Menentukan Fraksi Volume dan Pengayaan

Mengubah pada SRAC (PIJ), fraksi volume dan pengayaan. Fraksi volume menunjukkan persentase jumlah tiap-tiap material didalam teras reaktor yang meliputi bahan bakar, selongsong, dan moderator. Bahan bakar pada penelitian ini terdiri dari dua komposisi dengan perbedaan pada pengayaan. Komposisi pengayaan untuk bahan bakar pertama (U₁) mulai dari 2%-5% sedangkan untuk bahan bakar kedua (U₃) tetap yaitu 5%.

Menentukan Perhitungan Densitas Atom

Persamaan 1 tersebut digunakan untuk menghitung densitas atom Th²³². Rumus dasar yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \tag{1}$$

Dengan N adalah densitas atom (atom/cm³), ρ adalah massa jenis (gr/cm³), adalah bilangan Avogadro

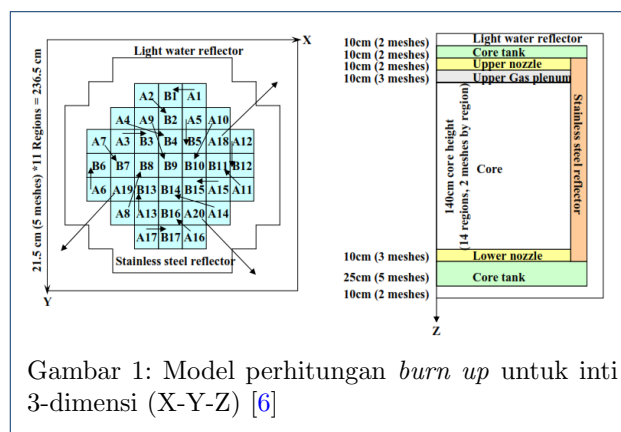
($6,02 \times 10^{23}$ atom/mol) dan M adalah massa molekul (gr/mol).

Menentukan Periode Setiap Step Burn Up

Setelah input data pada PIJ dan memanggil data Hist maka selanjutnya *input* pada COREBN yaitu periode berkisar 385 sampai 405 hari. Hasil ini akan menentukan untuk *input* selanjutnya pada daya reaktor termal.

Menentukan Daya Reaktor Termal

Daya termal reaktor yang akan digunakan yaitu 244 sampai 248 MWt. Contoh model perhitungan burn up inti 3-dimensi (X-Y-Z) yang dihitung menggunakan COREBN dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1: Model perhitungan *burn up* untuk inti 3-dimensi (X-Y-Z) [6]

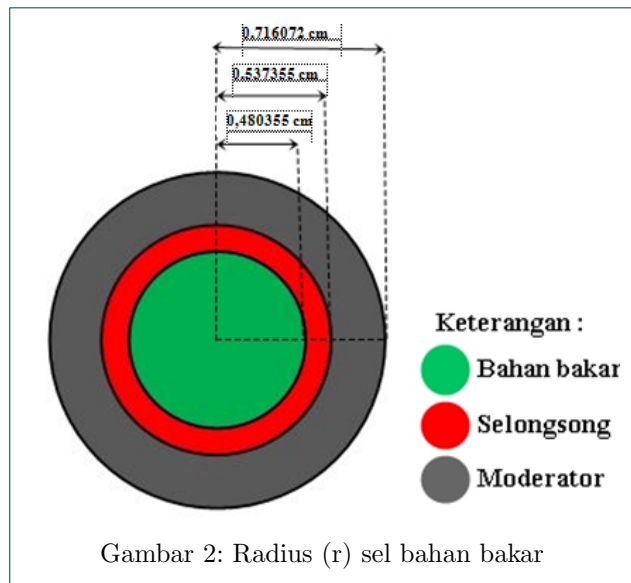
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Fraksi Volume

Perhitungan fraksi volume digunakan untuk menentukan persentase jumlah tiap-tiap material di dalam teras reaktor yang meliputi bahan bakar, selongsong dan moderator. Bentuk sel dari material adalah lingkaran sehingga dapat dihitung berdasarkan besarnya radius yang menunjukkan ketebalan masing-masing komponen yang ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan radius bahan bakar yaitu 0,480 cm, radius selongsong yaitu 0,537 cm dan radius moderator yaitu 0,716 cm. Gambar 2 menunjukkan persentase material yang digunakan pada teras reaktor adalah 45,0% bahan bakar, 11,3% selongsong dan 43,7% moderator. Total persentase material untuk HCLWR adalah 100%.

Pengayaan Bahan Bakar

ada penelitian digunakan 2 file pengayaan yaitu U₁ dan U₃ yang memiliki persentase yang berbeda dan fraksi volume awal yaitu 21,2% bahan bakar, 8,0% selongsong dan 70,9% moderator. Dilakukan

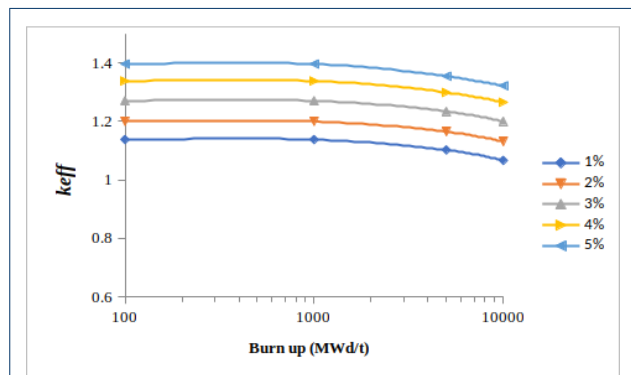


Gambar 2: Radius (r) sel bahan bakar

pengayaan untuk memperkaya jumlah persentase U_{233} dalam bahan bakar. Persentase yang digunakan untuk bahan bakar U_1 yaitu 1 sampai dengan 5% dan U_3 tetap 1% atau 5%. Berikut hasil perhitungan pengayaan bahan bakar pada Tabel 1.

Tabel 1: Pengayaan bahan bakar

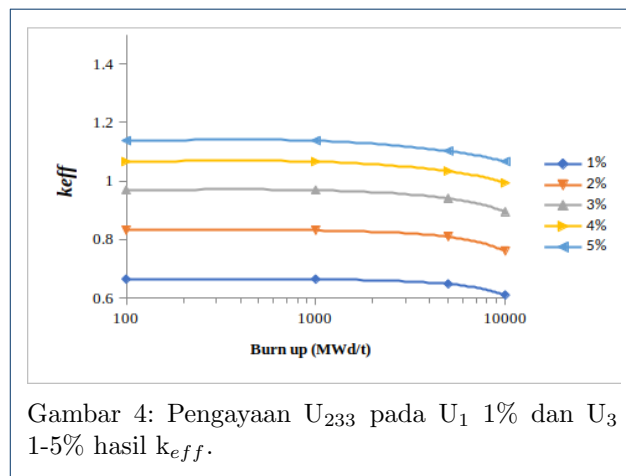
Pengayaan (%)	$Th^{232} \times 10^{24}$ (atom/cm ³)	$U^{233} \times 10^{24}$ (atom/cm ³)
1	$2,4297 \times 10^{-2}$	$2,4543 \times 10^{-4}$
2	$2,4051 \times 10^{-2}$	$4,9085 \times 10^{-4}$
3	$2,3806 \times 10^{-2}$	$7,3628 \times 10^{-4}$
4	$2,3560 \times 10^{-2}$	$9,8171 \times 10^{-4}$
5	$2,3315 \times 10^{-2}$	$1,2271 \times 10^{-3}$



Gambar 3: Pengayaan U_{233} pada U_1 1-5% dan U_3 5% hasil k_{eff} .

Pada Gambar 3 menunjukkan k_{eff} mendekati 1 pada pengayaan U_1 1% dan U_3 5%, bahwa semakin meningkatnya persentase pengayaan bahan

bakar, k_{eff} yang diperoleh juga semakin meningkat. Bertambahnya pengayaan maka akan menambah jumlah uranium yang ada di dalam reaktor, sehingga reaksi fisi yang terjadi juga akan bertambah. Terjadinya reaksi fisi berantai ditunjukkan oleh nilai k_{eff} [9].



Gambar 4: Pengayaan U_{233} pada U_1 1% dan U_3 1-5% hasil k_{eff} .

Gambar 4 menunjukkan k_{eff} tertinggi pada pengayaan U_3 5%, dari hasil tersebut k_{eff} yang terbaik pada U_3 4% dengan grafik yang landai sehingga dapat mempertahankan reaktor tetap hidup. Sesuai adanya pengaruh pengayaan bahan bakar terhadap nilai k_{eff} . Persentase pengayaan bahan bakar mempengaruhi nilai k_{eff} , dimana k_{eff} merupakan penyeimbang antara laju hilangnya neutron dengan laju produksi neutron [4].

Perubahan Periode

Penelitian selanjutnya dilakukan perubahan pada periode yang terdapat pada file CRBNgo. Pengayaan yang digunakan U_1 1% dan U_3 4% dengan periode berkisar 385 sampai 405 hari.

Tabel 2: Nilai k_{eff} dan CR perubahan periode

Hari	k_{eff}	CR
385	0,791691	0,850165
390	0,789916	0,852952
395	0,788178	0,855722
400	0,786445	0,858509
405	0,784724	0,86131

Tabel 2 menunjukkan Nilai k_{eff} dan CR perubahan periode, nilai k_{eff} tertinggi 0,791691 dan CR 0,86131, hasil yang diperoleh semakin bertambah hari k_{eff} menurun.

Perubahan Total Power

Perubahan total power yang terdapat pada file CRBNgo, periode yang digunakan 385 hari. Perubahan

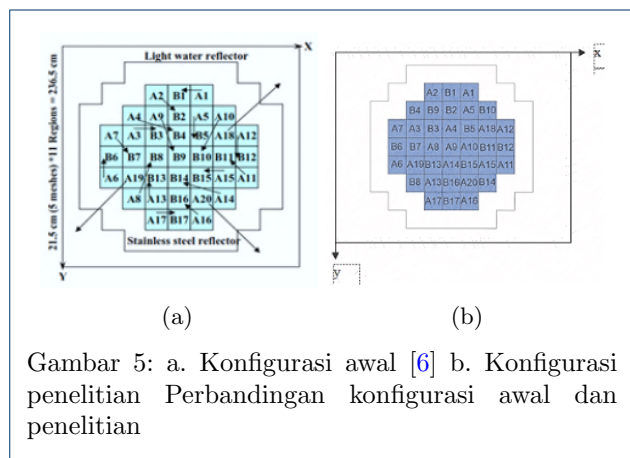
dilakukan berkisar 244 sampai 248 MWt. Berikut nilai k_{eff} dan CR perubahan total power pada Tabel 3. Tabel 3 menunjukkan Nilai keff dan CR perubahan

Tabel 3: Nilai k_{eff} dan CR perubahan Total Power

Total Power (MWt)	k_{eff}	CR
244	0,792753	0,848535
245	0,791663	0,850282
246	0,791691	0,850165
247	0,79053	0,852036
248	0,789989	0,852876

total power, nilai k_{eff} tertinggi 0,792753 dan CR 0,852876 hasil yang diperoleh semakin bertambah hari k_{eff} menurun.

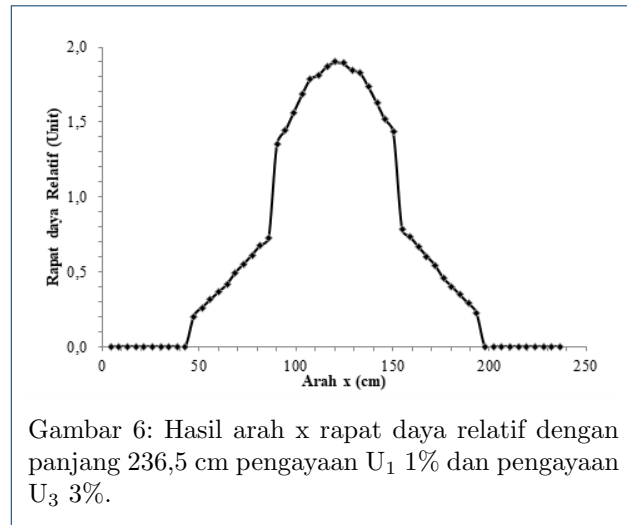
Perubahan Template (Konfigurasi)



Gambar 5: a. Konfigurasi awal [6] b. Konfigurasi penelitian Perbandingan konfigurasi awal dan penelitian

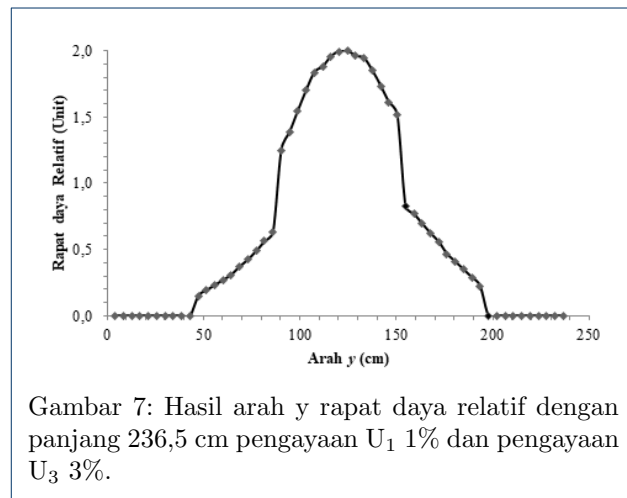
Pada Gambar 5 menunjukkan A dan B, A untuk mewakili U_3 dan B mewakili U_1 . Perubahan konfigurasi A9 dengan B9, A10 dengan B10, A8 dengan B8, A4 dengan B4, dan A14 dengan B14. Perubahan ini bertujuan agar terjadinya reaksi fisi berantai dan di peroleh nilai rapat daya yang konstan.

Tampak pada Gambar 6 bahwa nilai rapat daya relatif semakin meningkat pada arah χ yang semakin mengarah kedalam yaitu pada bagian bahan bakar. Hal ini disebabkan karena pada bagian bahan bakar merupakan tempat terjadinya reaksi fisi. Perhitungan rapat daya rata-rata pada arah χ 29 yaitu 176,7904 Watt/cm³, dengan faktor puncak (*peak factor*) daya 1,900763. Rapat daya relatif pada radius $0 < \chi < 43$ cm rapat daya yang dihasilkan adalah 0. Mengalami kenaikan pada radius $47 < \chi < 120$ cm, Kemudian mengalami penurunan hingga radius 197 cm, Pada radius $197 < \chi < 236,5$ cm rapat daya yang dihasilkan adalah 0. Hal ini karena pada daerah tersebut populasi neutron sangat sedikit akibat adanya



Gambar 6: Hasil arah x rapat daya relatif dengan panjang 236,5 cm pengayaan U_1 1% dan pengayaan U_3 3%.

reflektor sehingga reaksi fisi berantai dan distribusi rapat daya tidak terjadi pada daerah tersebut.

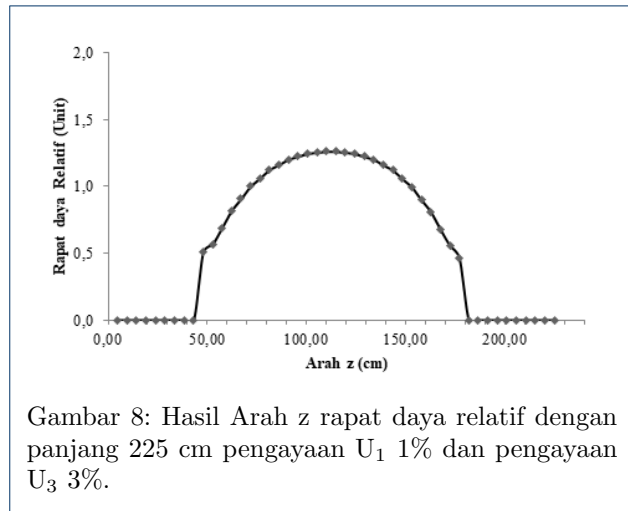


Gambar 7: Hasil arah y rapat daya relatif dengan panjang 236,5 cm pengayaan U_1 1% dan pengayaan U_3 3%.

Gambar 7 merupakan rapat daya relatif yang diperoleh pada arah y teras reaktor, Tampak pada Gambar 7 bahwa nilai rapat daya relatif semakin naik kedalam teras reaktor dan mengalami penurunan pada radius yang semakin mengarah keluar teras reaktor. Hal ini di sebabkan adanya bahan reflektor pada bagian luar teras reaktor, untuk mendapatkan faktor puncak daya ideal salah satunya adalah dengan melapisi bagian luar teras dan zona dekat pusat radial teras reaktor dengan reflektor. Zona dekat pusat radial berfungsi untuk mendaratkan daya yang memuncak pada pusat teras, sedangkan bagian terluar teras berfungsi untuk merefleksikan kemungkinan kebocoran neutron pada bagian terluar teras reaktor [10].

Tampak pada Gambar 7 menunjukkan bahwa rapat daya relatif mengalami kenaikan dan mengalami

penurunan. Hal ini karena bahan bakar terletak pada tengah dengan Watt/cm³, dengan faktor puncak daya 1,996904. Rapat daya relatif pada radius $0 < y < 43$ cm yang dihasilkan adalah 0. Mengalami kenaikan dengan nilai faktor puncak daya 1,996904 pada radius $47 < y < 120$ cm, Kemudian mengalami penurunan hingga radius 193 cm, Pada radius $197 < y < 236,5$ cm rapat daya yang dihasilkan adalah 0. Konfigurasi pengayaan yang lebih besar. Perhitungan rapat memperoleh rapat daya rata-rata pada arah y 28 yaitu 168,2788



Gambar 8: Hasil Arah z rapat daya relatif dengan panjang 225 cm pengayaan U₁ 1% dan pengayaan U₃ 3%.

Gambar 8 menunjukkan distribusi rapat daya pada arah z teras reaktor dengan tinggi teras 225 cm. Tampak pada Gambar 8 bahwa 1 mesh mewakili 4,787234 cm. Perhitungan rapat daya memperoleh rapat daya rata-rata pada baris z 23 yaitu 265,9716 Watt/cm³, dengan faktor puncak daya 1,263431. Daerah $0 < z < 43$ cm dan daerah $181 < z < 225$ 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 $47 < z < 177$ cm.

Desain Reaktor Paling Ideal

Penelitian ini bertujuan untuk perhitungan *burn up* sebuah reaktor HCLWR dengan teras x-y-z tiga dimensi yang memenuhi kriteria kekritisitas dan menghasilkan rasio konversi secara maksimal. Setelah dilakukan perhitungan, penelitian, analisis, dan pembahasan diperoleh teras reaktor yang kondisinya paling ideal adalah pada konfigurasi Gambar 5 memperoleh CR 1.00574, k_{eff} 0.9015678, rapat daya maksimum 336,0367 Watt/cm³ dengan pengayaan bahan bakar U₁ 1% dan U₃ 3%, periode 150 hari dan fraksi volume 45,0% bahan bakar, 11,3% selongsong, 43,7% moderator.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1 Semakin besar persentase pengayaan pada U²³³, maka nilai k_{eff} akan semakin meningkat. Persentase yang optimal pada pengayaan bahan bakar U₁ 1% dan U₃ 4%.
- 2 Semakin lama periode *burnup* (385-405 hari) dan besar total power (244-247 MWt), maka nilai k_{eff} akan menurun dan nilai CR meningkat.
- 3 Perubahan konfigurasi memperoleh rapat daya maksimum 336,0367 Watt/cm³ dan nilai rapat daya yang konstan pada kolom x baris y, dan z.
- 4 Desain reaktor yang dapat menghasilkan nilai rasio konversi 1 dengan k_{eff} dapat membuat reaktor menyala hingga akhir yaitu ketika pengayaan bahan bakar U₁ 1% dan U₃ 3%, periode 150 hari dan fraksi volume 45,0% bahan bakar, 11,3% selongsong, 43,7% moderator.

PENULIS

- 1 Hasni Handayani

Dari :

(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung

- 2 Yanti Yulianti

Dari :

(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung

- 3 Posman Manurung

Dari :

(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung

Pustaka

1. Ahied M. Efisiensi Material pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir LWR (Light Water Reactor) dan PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor). J Pena Sains. 2015;2(1):1-6.
2. Ishiguro Y. Development of High Conversion Light Water Reactor. JAERI. 1988;26(1):33-36.
3. Fizzotti C. Principles of Nuclear Fuel Production. 1. Uranium and Plutonium. ENEA BATAN; 1984.
4. Ariani M, Su'ud Z, Monado F. Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 Mwth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar. J Ilmu Dasar. 2013;14(1):11-15.
5. Okumura K, Kugo T, Kaneko K, Thuchihashi K. The comprehensive neutronics calculation code system. Japan: JAEA; 2002.
6. Okumura K. COREBN: A Core Burn-up Calculation Module for SRAC2006. Japan: JAEA; 2007.
7. Ariani M, Supardi, Su'ud Z, Monado F. Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas untuk PLTN. In: J. Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN Barat. Pontianak: Universitas Tanjungpura; 2015. p. 39-45.
8. Ardiansyah H, Agung A, Widi AH. Studi Parameter Desain Teras Integral Pressurized Water Reactor dengan Bahan Bakar Mixed Oxide Fuel Menggunakan Program SRAC. J Forum Nuklir (JFN). 2018;12(2):61-72.

9. Utami R, Yulianti Y. Desain Reaktor Air Superkritis (Super Critical Water Reactor) dengan Bahan Bakar Thorium. *Jurnal Ilmu Dasar*. 2013;14(1):1–6.
10. Rokhman SN, Widiarto A, Kusnanto. Performa Neutronik Bahan Bakar LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄ pada Small Mobile-Molten Salt Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. 2011;13(3):173–185.