

Table of Contents

Articles

Identifikasi Bidang Gelincir dengan Metode Geolistrik Tahanan Jenis 2 Dimensi di Daerah Keranggan, Tangerang Selatan <i>Miftahul Farhati, Mohammad Syamsu Rosid</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.53584	PDF 1-8
Studi Desain Boiling Water Reactor (BWR) Berdaya 100MW Berbahan Bakar Thorium Karbida <i>Ratna Dewi Syarifah, Alvi Nur Sabrina, Wenny Maulina, Artoto Arkundato, Endhah Purwandari, Lutfi Rohman</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.51214	PDF 9-17
Investigasi Sumber Mineral Magnetik pada Sedimen Sungai Biyonga Sebagai Inlet Danau Limboto Menggunakan Parameter Suseptibilitas Magnetik <i>Raghel Yunginger, Idawati Supu, Siti Zulaikah, Arif Wijaya, Andi Indra Wulan Sari Ramadani, Mariyanto Mariyanto</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.50470	PDF 18-28
Kontribusi Massa Air Tawar dari Estuari Banyuasin ke Perairan Selat Bangka pada Musim Peralihan II <i>Heron Surbakti, I Wayan Nurjaya, Dietrich G Bengen, Tri Prariono</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.53035	PDF 29-38
The Effect of Cell Surface Area on the Effectivity and Reusability of Bixin Sensitized Solar Cells <i>Anissa Bella Maharani, Lia Destiarti, Winda Rahmalia</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.53409	PDF 39-48
Analisis Kecenderungan Hujan Ekstrem Berbasis Indeks Iklim Ekstrem Periode Tahun 1990-2019 di Kalimantan Barat <i>Riri Nur Ariyani, Muliadi Muliadi, Riza Adriat</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.47312	PDF 49-59
Implementasi Multibeam Echosounder untuk Pengukuran dan Analisis Data Kedalaman Perairan Teluk Jakarta Berdasarkan Standar International Hydrographic Organization <i>Henry Manik, Christian Nugroho, Dwiadji Gultom, Muhammad Firdaus</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.51833	PDF 60-71
Water Hyacinth Utilization: A New Perspective on the Smoke-salted Duck Egg Process in Three Different Blended Fuels <i>Sukarman Sukarman, Khoirudin Khoirudin, Dodi Mulyadi, Nana Rahdiana, Apang Djafar Ashiedieque</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.54174	PDF 72-79
Optimalisasi Data Gayaberat untuk Pemodelan Struktur Geologi Bawah Permukaan Daerah Kepulauan Sabu-Raijua, Nusa Tenggara Timur, Indonesia <i>Accep Handyarso</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.54321	PDF 80-91
Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi Gunung Ijen Jawa Timur Berdasarkan Pemodelan 2 Dimensi Anomali Geomagnetik <i>Alimuddin Muchtar, Zelica K. M. Manurung, Rustadi Rustadi, Yasa Suparman, M. Ishak Jumarang</i> doi> 10.26418/positron.v12i1.49130	PDF 92-97

Studi Desain *Boiling Water Reactor* (BWR) Berdaya 100MWt Berbahan Bakar Thorium Karbida

Design Study of 100MWth Boiling Water Reactor (BWR) with Thorium Carbide Fuel

Ratna Dewi Syarifah^{a*}, Alvi Nur Sabrina^a, Wenny Maulina^a, Artoto Arkundato^a, Endhah Purwandari^a, Lutfi Rohman^a

^aDepartemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam – Universitas Jember, Jalan Kalimantan No 37, Jember 68121, Jawa Timur, Indonesia

*Email : rdsyarifah.fmipa@unej.ac.id

(Diterima 19 Desember 2021; Disetujui 24 Februari 2022; Dipublikasikan 31 Mei 2022)

Abstrak

Reaktor air didih atau *boiling water reactor* (BWR) merupakan reaktor yang memanfaatkan air sebagai media pendingin dan juga sebagai moderator. Penelitian ini mendesain reaktor air didih berbentuk modul atau *small modular reactor* (SMR) berdaya 100MWth berbahan bakar Thorium Karbida (Th-U233-C), selongsong Silikon Karbida (SiC) dan pendingin air (H₂O). Perhitungan neutronik dilakukan dengan menggunakan program SRAC versi 2006 dengan database nuklir JENDL 4.0. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa reaktor air didih berbentuk modul dengan bahan bakar Thorium Karbida yang diberi tambahan Protaktinium-231 (Pa-231) sebanyak 6% menunjukkan hasil paling kritis. Reaktor mampu beroperasi selama 20 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar dengan maksimum faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) 1,00392. Nilai maximum *excess reactivity* yang dihasilkan sangat kecil dibawah 1% yakni 0,39% $\Delta k/k$ dan densitas daya maksimum yang dihasilkan bernilai 59 watt/cc.

Kata kunci: BWR, Excess Reactivity, k_{eff} , Protaktinium-231, Thorium Karbida

Abstract

Boiling water reactor (BWR) is a reactor that uses water as a cooling medium and also as a moderator. This research designs a boiling water reactor in the form of a module or small modular reactor (SMR) with 100MWth power with Thorium Carbide (Th-U233-C) fuel, Silicon Carbide (SiC) as a cladding and water as a coolant (H₂O). The neutronic calculations were carried out using SRAC ver2006 program with the JENDL 4.0 as a nuclear database. The results obtained that the boiling water reactor in the form of a module with Thorium Carbide fuel added with 6% Protactinium-231 (Pa-231) showed the most critical results. The reactor is capable of operating for 20 years without refueling with a maximum effective multiplication factor (k_{eff}) of 1.00392. The maximum excess reactivity value produced is very small below 1%, i.e. 0.39% $\Delta k/k$ and the maximum power density produced is 59 watts/cc.

Keywords: BWR, Excess Reactivity, k_{eff} , Protactinium-231, Thorium Carbide fuel

1. Latar Belakang

Batubara adalah salah satu energi yang paling banyak digunakan sebagai sumber energi pembangkit listrik di Indonesia [1]. Sumber energi fosil seperti batubara memiliki keterbatasan dalam pemanfaatannya akibat emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses pembakarannya [2]. Energi nuklir merupakan salah satu energi terbarukan yang tidak mengeluarkan gas CO₂ sebagai emisinya. Oleh karena itu, energi nuklir merupakan energi

alternatif yang berpotensi sebagai sumber pembangkit listrik di Indonesia.

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pada dasarnya merupakan pembangkit listrik berdaya termal yang memanfaatkan uap bertekanan tinggi yang dihasilkan dari proses fisi di dalam reaktor nuklir untuk memutar turbin generator listrik [3]. Sebanyak 80% reaktor yang dioperasikan di dunia, merupakan reaktor tipe air ringan atau *light water reactor* (LWR). Terdapat dua jenis LWR yang paling banyak dikembangkan,

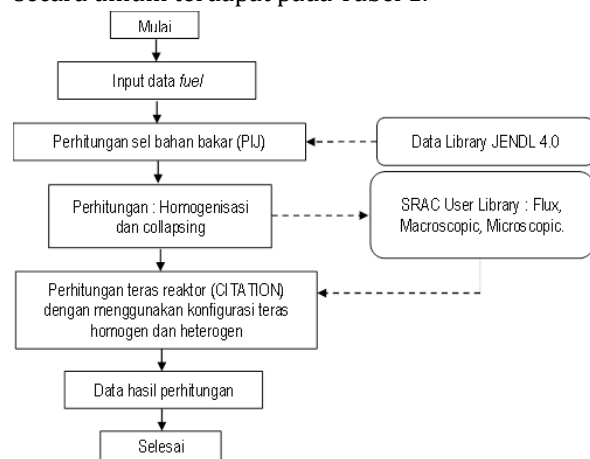
yaitu *boiling water reactor* (BWR) dan *pressurized water reactor* (PWR). Reaktor PWR dan BWR memiliki perbedaan pada bagian konstruksi bejana yang digunakan pada masing-masing reaktor [4]. Analisis neutronik tentang BWR telah dilakukan sebelumnya oleh Trianti [5-10] dengan menggunakan bahan Thorium Oksida (ThO₂) dan Thorium Nitrida (ThN) dengan tambahan *burnable poisons* berupa Protaktinium-231 (Pa-231) dan Gadolinium. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan bahan bakar yang berbeda yaitu Thorium Karbida (Th-U233-C) dengan penambahan Pa-231 sebagai *burnable poison*. Pemilihan bahan bakar karbida dilakukan karena bahan bakar karbida memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar nitrida dan oksida [11]. Bahan bakar terdiri dari thorium alam dengan bahan bakar fisil U-233. Perhitungan neutronik dilakukan dengan menggunakan kode *standard reactor analysis code* (SRAC) versi 2006 dan database nuklir JENDL 4.0. SRAC memiliki perpustakaan atau kumpulan data mengenai penampang neutron, kode-kode tambahan yang digunakan dalam analisis dan desain reaktor nuklir, rutinitas atau pergerakan dari spektrum neutron, transpor neutron, difusi *one group-multigroup*, hingga rutinitas pembakaran sel [12]. SRAC merupakan sistem yang dirancang untuk melakukan perhitungan neutronik pada berbagai reaktor termal. Database yang digunakan dalam SRAC itu sendiri meliputi JENDL, ENDF/B, dan JEF yang memiliki lebih dari 300 data nuklida [13]. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis neutronik reaktor air didih (BWR) dengan menggunakan SRAC Code, dengan perhitungan sel - *PIJ Calculation* dan perhitungan teras CITATION 2D (2 Dimensi). Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui prospek bahan bakar Thorium Karbida (Th-U233-C) dipakai dalam reaktor BWR.

2. Metodologi

Perhitungan desain optimal dari *small modular boiling water reactor* dalam penelitian ini, dilakukan berdasarkan diagram pada Gambar 1.

Perhitungan diawali dengan perhitungan sel bahan bakar dengan kode PIJ, lalu dilakukan perhitungan homogenisasi dan *collapsing* sehingga menghasilkan data flux, data *macroscopic* dan *microscopic*. Data ini yang digunakan untuk perhitungan teras reaktor dengan menjalankan kode *CITATION*. Perhitungan sel bahan bakar dan

teras reaktor melalui dua konfigurasi teras reaktor, yaitu konfigurasi teras homogen dan konfigurasi teras heterogen. Pada konfigurasi teras homogen, bahan bakar hanya terdiri satu jenis bahan bakar dengan persentase U-233 yang sama, sedangkan pada konfigurasi teras heterogen terdapat tiga jenis persentase U-233 pada satu teras reaktor. Perhitungan konfigurasi teras heterogen akan mengalami proses penambahan racun bakar atau *burnable poisons* berupa Protaktinium-231 (Pa-231). Penambahan Pa-231 sebagai racun bakar berfungsi untuk menurunkan nilai k_{eff} dari awal tahun pembakaran hingga akhir tahun pembakaran [14]. Spesifikasi desain reaktor secara umum terdapat pada Tabel 1.



Gambar 1. Diagram alir perhitungan neutronik pada SRAC

Reaktor air didih atau *boiling water reactor* (BWR) pada penelitian ini memiliki desain teras reaktor dengan tinggi teras aktif 100 cm, dan diameter teras aktif 300 cm. Geometri teras yang digunakan adalah geometri *cylinder pancake*, merujuk pada penelitian sebelumnya tentang LWR [15]. Ukuran pin cel bahan bakar berdiameter 1,45 cm. Reaktor didesain dapat beroperasi selama >20 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar.

Tabel 1. Spesifikasi umum desain teras reaktor

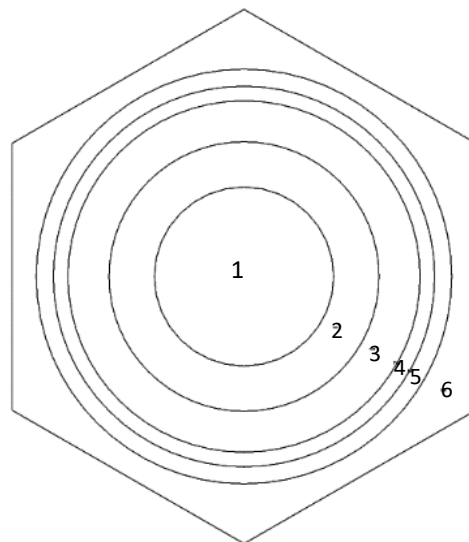
Parameter	Spesifikasi
Daya (termal)	100 MWth
Periode <i>burn-up</i>	≥ 20 tahun
Geometri teras	<i>Cylinder pancake</i>
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	Thorium karbida
Selongsong (<i>cladding</i>)	Silikon karbida
Pendingin (<i>coolant</i>)	H ₂ O
Bentuk <i>fuel pin cell</i>	<i>Hexagonal cell</i>
Diameter (<i>pin pitch</i>)	1,45 cm
Tinggi teras aktif	100 cm
Diameter teras aktif	300 cm

Spesifikasi desain bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini terdapat pada Tabel 2. Bentuk dari *pin cell* bahan bakar yang digunakan merupakan tipe *hexagonal cell*. Gambar 2 merupakan *output* gambar *hexagonal cell* oleh SRAC2006 dengan region *pin cell* bahan bakar yang digunakan terbagi menjadi 6 region, yaitu 3 region pertama adalah bahan bakar, 2 region berikutnya adalah *cladding*, dan 2 region terakhir adalah *coolant*. Pemilihan spesifikasi bahan ini merujuk kepada penelitian sebelumnya mengenai LWR, baik BWR maupun PWR [5-11,15-16]. Gambar 3 merupakan gambar teras reaktor yang dipotong seperempat bagiannya. Di dalam teras terdapat *fuel* (bahan bakar) yang dikelilingi oleh reflektor. Perhitungan teras dihitung dengan menggunakan metode CITATION 2D (2 Dimensi). Untuk konfigurasi teras heterogen, bahan bakar dibagi menjadi 3 tipe bahan bakar dengan variasi persentase U-233 yang berbeda-beda. Gambar 4 merupakan konfigurasi teras heterogen, angka 1

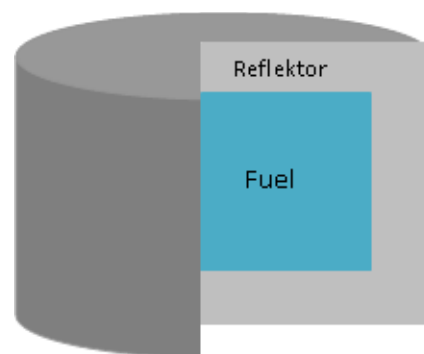
ditujukan untuk *Fuel1*, angka 2 untuk *Fuel2*, angka 3 untuk *Fuel3*, dan angka 4 untuk reflektor. Pada konfigurasi teras heterogen pada gambar 4, tiap mesh bahan bakar memiliki panjang sisi dan lebar sisi 5 cm.

Tabel 2. Spesifikasi sel bahan bakar

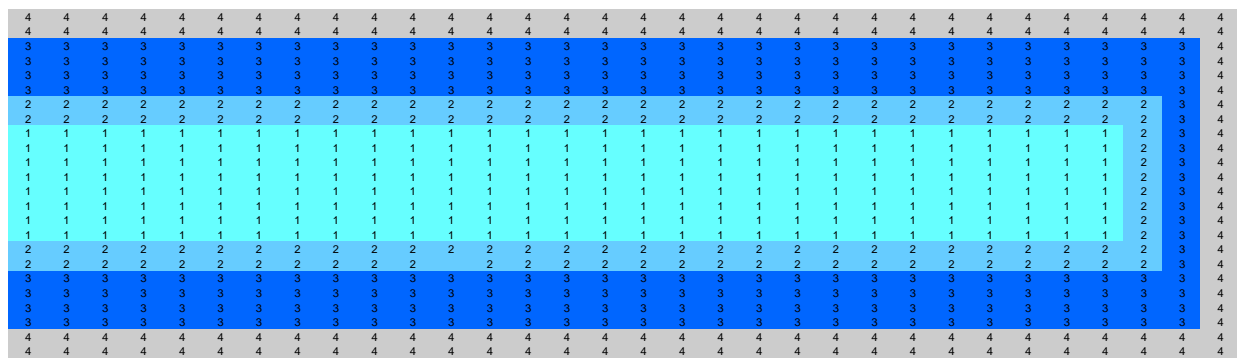
Parameter	Spesifikasi
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	Thorium Karbida (Th-U233-C)
Material selongsong (<i>cladding</i>)	Silikon Karbida (SiC)
Pendingin (<i>coolant</i>)	H ₂ O
Tipe pin cell	Hexagonal cell
<i>Burnable poison</i>	Protaktinium-231
Persentase <i>burnable poison</i>	1% - 7%
Fraksi bahan bakar (%)	50% - 65%
Fraksi <i>cladding</i> (%)	10%
Fraksi <i>coolant</i> (%)	25% - 40%



Gambar 2. Geometri heksagonal representasi *fuel pin* (PI) *output* dari kode SRAC2006



Gambar 3. Teras reaktor yang diambil seperempat bagiannya

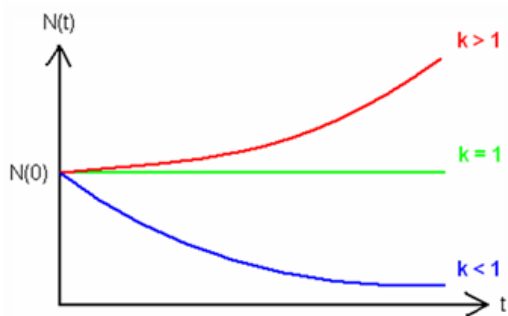


Gambar 4. Konfigurasi teras heterogen ketika diambil seperempat teras sesuai dengan tipe bahan bakarnya (1 untuk *Fuel1*, 2 untuk *Fuel2*, 3 untuk *Fuel3*, 4 untuk reflektor)

Desain optimal dari suatu reaktor, dapat ditentukan dari nilai kekritisan di dalam reaktor. Nilai kekritisan dari reaktor dapat dilihat dari nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) yang diperoleh melalui perhitungan neutronik pada program SRAC2006 dan nilai *maximum excess reactivity* yang diperoleh dari persamaan berikut :

$$excess\ reactivity\ (\rho) = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}} \quad (1)$$

Reaktor dapat dikatakan berada dalam keadaan kritis atau stabil apabila nilai $k_{eff} \sim 1$ [17]. Kondisi kekritisan reaktor berdasarkan nilai *multiplication factor* terbagi menjadi 3, yaitu subkritis, kritis dan superkritis. Reaktor dapat dikatakan berada dalam keadaan kritis apabila nilai $k=1$, berada dalam keadaan subkritis ketika nilai $k < 1$, dan berada dalam keadaan superkritis ketika nilai $k > 1$ [18]. Gambar 5 menjelaskan kondisi kekritisan di dalam reaktor melalui nilai *multiplication factor*.



Gambar 5. Kondisi kekritisan reaktor berdasarkan nilai *multiplication factor* [18]

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menggunakan reaktor air didih atau *boiling water reactor* (BWR) berbentuk modul dengan bahan bakar berupa thorium karbida (Th-

U233-C). Perhitungan teras homogen dilakukan dengan reaktor berdaya *input* 100 MWth, fraksi bahan bakar 50%, fraksi selongsong 10%, dan fraksi pendingin 40%. Bahan bakar yang digunakan berupa thorium karbida (Th-U233-C) dengan variasi persentase U-233 sebanyak 3% sampai 11%. Pada perhitungan konfigurasi teras homogen, nilai k_{inf} paling stabil diperoleh ketika variasi U-233 6% dan Th-232 94%, nilai k_{inf} maksimum yang diperoleh sebesar 1,013324 dengan *trend line* grafik yang paling landai ($k_{inf} \sim 1$).

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada perhitungan konfigurasi teras homogen yaitu k-inf paling stabil pada variasi persentase U-233 6%, maka untuk perhitungan konfigurasi teras heterogen, persentase rata-rata yang digunakan untuk tiga jenis persentase U-233 adalah 6%. Tabel 3 merupakan tabel variasi nilai persentase bahan bakar yang digunakan dalam perhitungan teras heterogen.

Tabel 3. Variasi persentase bahan bakar pada perhitungan konfigurasi teras heterogen

Variasi ke-n	Persentase U-233		
	<i>Fuel1</i> (F1)	<i>Fuel2</i> (F2)	<i>Fuel3</i> (F3)
1	F1 = 3%	F2 = 6%	F3 = 9%
2	F1 = 3,5%	F2 = 6%	F3 = 8,5%
3	F1 = 4%	F2 = 6%	F3 = 8%
4	F1 = 4,5%	F2 = 6%	F3 = 7,5%
5	F1 = 5%	F2 = 6%	F3 = 7%
6	F1 = 5,5%	F2 = 6%	F3 = 6,5%

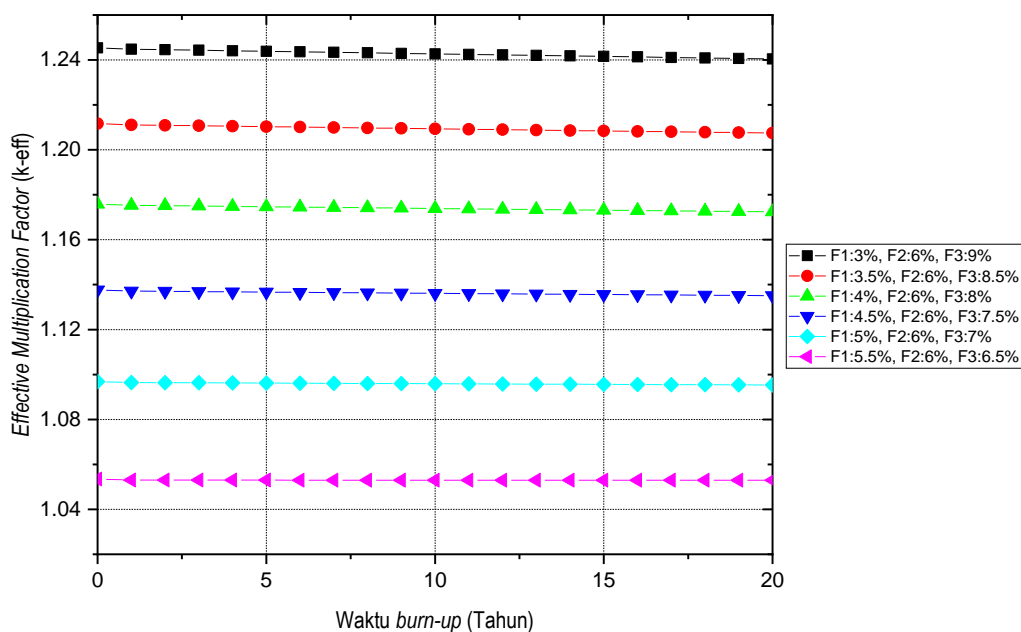
Gambar 6 merupakan grafik nilai k_{eff} untuk perhitungan konfigurasi teras heterogen. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa variasi bahan bakar ke-6, dengan perbandingan persentase U-233 F1=5,5%, F2=6% dan F3=6,5% merupakan

variasi persentase bahan bakar yang memiliki perolehan nilai k_{eff} paling stabil atau paling mendekati keadaan kritis ($k_{eff} \sim 1$) sebesar 1,05344. Perhitungan pada konfigurasi teras heterogen paling stabil menghasilkan nilai *maximum excess reactivity* sebesar 5,07% $\Delta k/k$, densitas daya rata-rata 20,1 watt/cc dan nilai densitas daya maksimum yang diperoleh bernilai 57,7 watt/cc. Nilai *excess reactivity* dicari dengan menggunakan persamaan (1).

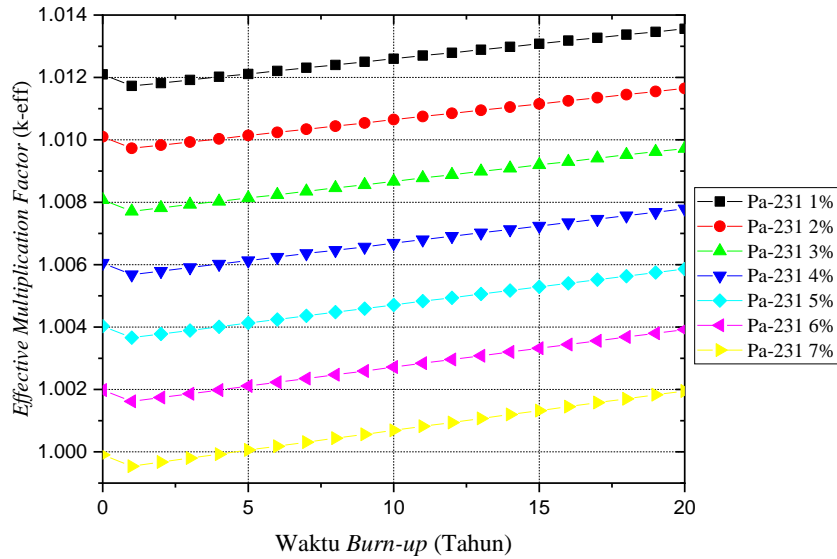
Penambahan protaktinium-231 (Pa-231) pada bahan bakar bertujuan sebagai racun bakar atau *burnable poisons*. Penambahan racun bakar dalam perhitungan konfigurasi teras heterogen bertujuan untuk meningkatkan masa operasi reaktor dan dapat meningkatkan distribusi daya di dalam teras reaktor [9].

Gambar 7 merupakan grafik hasil perhitungan konfigurasi teras heterogen dengan penambahan Pa-231. Variasi persentase Pa-231 yang digunakan antara 1% sampai 7%. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penambahan Pa-231 sebanyak 6% pada bahan bakar menghasilkan nilai k_{eff} paling kritis. Nilai k_{eff} maksimum yang

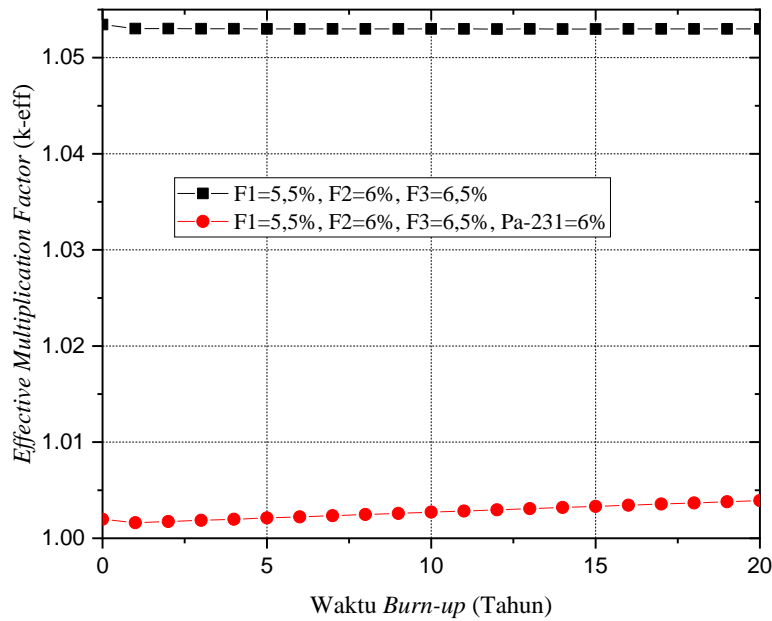
diperoleh sebesar 1,00392 dan nilai *maximum excess reactivity* sebesar 0,39% $\Delta k/k$. Kondisi kritis diperoleh saat reaktor beroperasi menggunakan fraksi bahan bakar 60%, selongsong 10%, dan pendingin 30%. Pada penelitian ini, baik pada konfigurasi teras homogen maupun heterogen menggunakan fraksi bahan bakar, selongsong dan pendingin yang sama, demikian pula pada step variasi persentase Pa-231 1% sampai 7% memiliki variasi fraksi bahan bakar, selongsong dan pendingin yang sama, yaitu fraksi bahan bakar 60%, selongsong 10%, dan pendingin 30%. Densitas daya pada keadaan optimal mengalami peningkatan, pada konfigurasi teras heterogen menghasilkan nilai densitas daya maksimum sebesar 57,7 watt/cc, dan setelah diberi tambahan Pa-231 nilai densitas daya maksimum yang dihasilkan meningkat menjadi 59 watt/cc. Pa-231 memiliki penampang lintang absorpsi yang lebih besar daripada U-233, sehingga Pa-231 sering dijadikan sebagai racun bakar atau *burnable poison* karena sifat Pa-231 yang mampu menyerap neutron sehingga mengurangi nilai k_{eff} .



Gambar 6. Grafik hubungan nilai k_{eff} terhadap waktu *burn-up* konfigurasi teras heterogen



Gambar 7. Grafik hubungan k_{eff} terhadap waktu *burn-up* pada penambahan Protaktinium-231 (Pa-231)

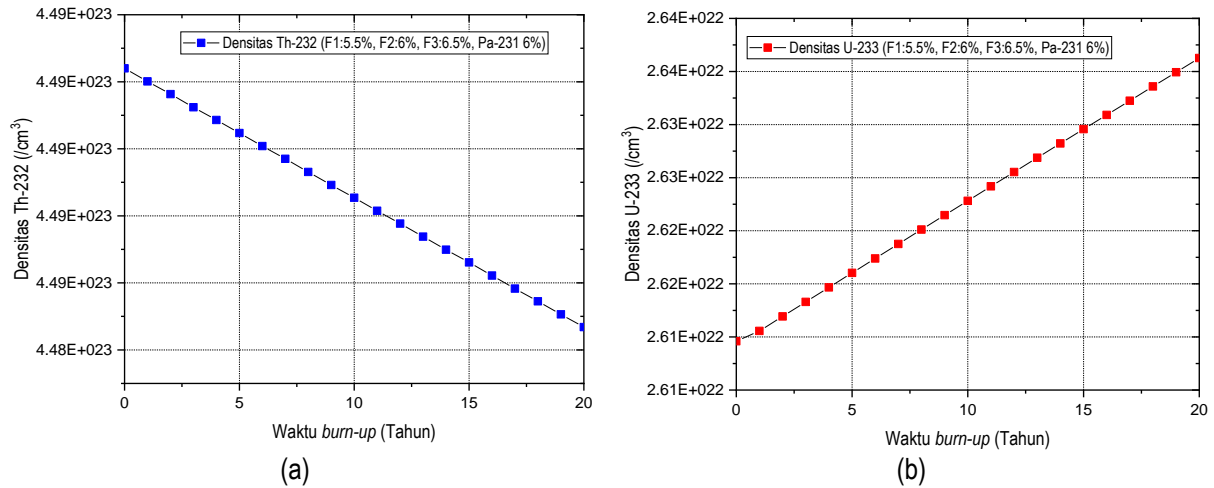


Gambar 8. Grafik hasil optimasi perhitungan BWR berdaya 100 MWth

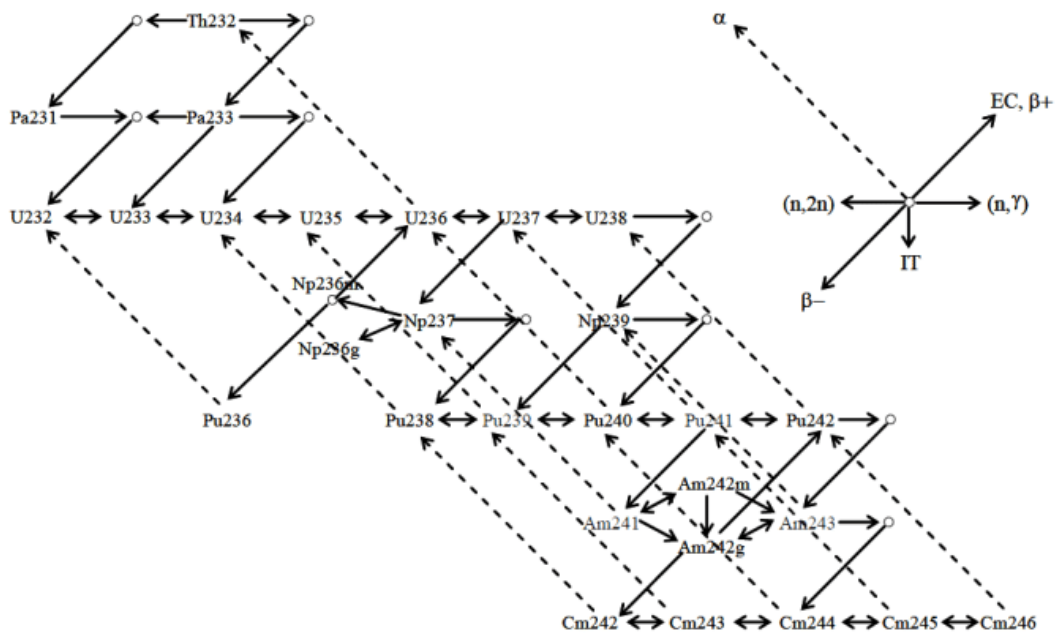
Gambar 8 menunjukkan grafik hasil optimasi perhitungan BWR berdaya 100 MWth. Grafik dengan garis berwarna hitam merupakan kondisi reaktor pada konfigurasi teras heterogen tanpa tambahan *burnable poisons*, sedangkan grafik dengan garis merah merupakan kondisi reaktor pada konfigurasi teras heterogen yang diberi tambahan *burnable poisons* berupa Pa-231. Berdasarkan grafik yang telah diperoleh dapat diketahui bahwa penambahan Pa-231 pada bahan bakar menyebabkan nilai k_{eff} turun mendekati 1 ($k_{eff} \sim 1$). Hal ini disebabkan karena Pa-231 menyerap neutron lebih banyak dari pada U-233. Nilai *maximum excess reactivity* yang diperoleh

sangat kecil yakni 0,39% $\Delta k/k$ dengan waktu hidup reaktor selama 20 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar.

Gambar 9 merupakan grafik jumlah densitas nuklida Th-232 dan U-233 selama 20 tahun *burn-up*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa jumlah Th-232 mengalami penurunan selama waktu *burn-up*. Penurunan nilai densitas Th-232 terjadi karena Th-232 menyerap neutron dan mengalami dua kali reaksi beta minus sehingga menjadi material fisil U-233. Oleh karena itu, pada Gambar 9, jumlah U-233 mengalami kenaikan selama waktu *burn-up*. Hal ini sesuai dengan rantai *burn-up* Thorium yang ada pada Gambar 10.



Gambar 9. Densitas nuklida (a) Th-232 dan (b) U-233 selama waktu *burn-up*



Gambar 10. Rantai burn-up Th-232 pada kode SRAC versi 2006 [13]

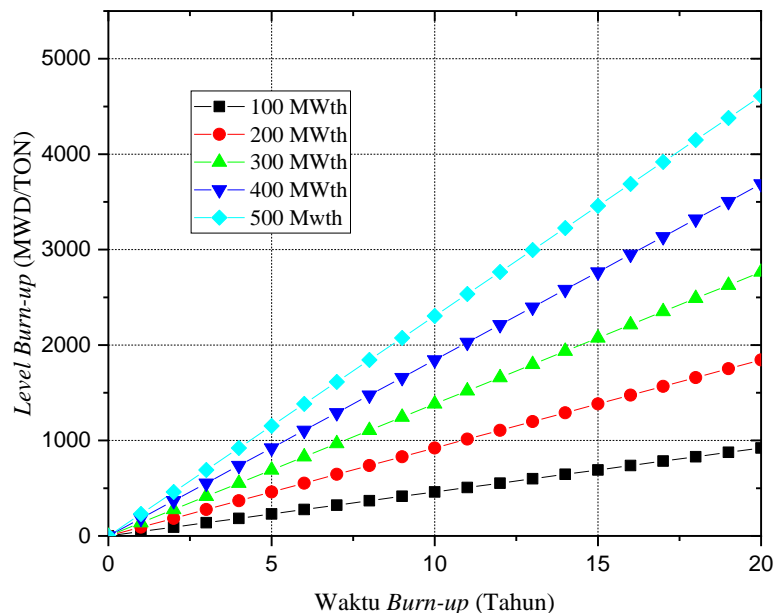
Tabel 4. Nilai densitas daya maksimum dari variasi daya 100-500 MWth

Variasi daya reaktor (MWth)	Densitas daya maksimum (watt/cc)
100	59,03
200	118,07
300	177,10
400	236,14
500	295,18

Pada penelitian ini juga dilakukan variasi daya antara 100 MWth sampai 500 MWth. Tabel 4 merupakan nilai densitas daya maksimum yang dihasilkan selama reaktor diberi variasi daya 100-500 MWth. Semakin besar daya pada reaktor maka densitas daya maksimumnya juga semakin besar.

Hal ini berarti semakin besar daya reaktor, maka reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor semakin banyak sehingga densitas dayanya juga semakin besar.

Analisis neutronik juga terkait dengan analisis pembakaran atau *burn-up analysis* yang terjadi di dalam reaktor nuklir. Gambar 11 merupakan grafik yang menunjukkan tingkat pembakaran yang terjadi di dalam reaktor. Tingkat pembakaran atau level *burn-up* pada penelitian ini berlangsung selama 20 tahun. Energi per satuan berat yang diperoleh mengalami peningkatan seiring dengan waktu *burn-up* dan daya reaktor. Hal ini dikarenakan Th-232 telah berubah menjadi material fisil berupa U-233. Tabel 5 merupakan



Gambar 11. Grafik level burn-up Th-U233-C

Tabel 5. Nilai k_{eff} untuk daya 100 – 500 MWth yang memiliki masa operasi 20 tahun

Tahun\Daya	100 Mwth	200 Mwth	300MWth	400 Mwth	500 Mwth
0	1,00198	1,00198	1,00198	1,00198	1,00198
1	1,00162	1,00164	1,00167	1,0017	1,00173
2	1,00174	1,00189	1,00205	1,0022	1,00235
3	1,00186	1,00214	1,00242	1,0027	1,00297
4	1,00198	1,00239	1,00279	1,00319	1,00359
5	1,00211	1,00263	1,00316	1,00368	1,00421
6	1,00223	1,00288	1,00353	1,00418	1,00482
7	1,00235	1,00313	1,0039	1,00467	1,00544
8	1,00247	1,00338	1,00426	1,00516	1,00605
9	1,00259	1,00362	1,00463	1,00565	1,00665
10	1,00272	1,00387	1,00500	1,00613	1,00726
11	1,00284	1,00411	1,00537	1,00662	1,00786
12	1,00296	1,00436	1,00573	1,0071	1,00846
13	1,00308	1,0046	1,00609	1,00758	1,00906
14	1,0032	1,00484	1,00646	1,00806	1,00965
15	1,00332	1,00509	1,00682	1,00854	1,01025
16	1,00344	1,00533	1,00718	1,00901	1,01083
17	1,00356	1,00557	1,00754	1,00949	1,01142
18	1,00368	1,00581	1,00789	1,00996	1,01200
19	1,00380	1,00605	1,00825	1,01043	1,01258
20	1,00392	1,00629	1,00861	1,0109	1,01315

Nilai k_{eff} untuk daya 10-500 MWth yang memiliki masa operasi 20 tahun. Pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa nilai k_{eff} mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya nilai burn-up.

4. Kesimpulan

Studi desain reaktor tipe BWR berdaya 100MWth berbahan bakar uranium karbida telah

dilakukan. Desain optimal reaktor yang didapatkan memiliki nilai k_{eff} maksimum 1,00392 dan nilai *excess reactivity* maksimum sebesar 0,39% $\Delta k/k$ untuk operasi 20 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar. Desain tersebut diperoleh ketika reaktor beroperasi pada konfigurasi teras heterogen dengan persentase U-233 F1=5,5%, F2=6%, F3=6,5%. Bahan bakar yang digunakan diberi tambahan Pa-231 variasi 6%, daya input

100 MWth, fraksi bahan bakar 60%, fraksi *cladding* 10%, dan fraksi *coolant* 30%. Penambahan Pa-231 sebagai racun bakar memberikan efek penurunan pada nilai k_{eff} karena Pa-231 mempunyai penampang lintang absorpsi lebih besar dari pada U-233. Semakin besar daya reaktor menyebabkan nilai densitas daya maksimum juga semakin tinggi dan juga menyebabkan perubahan nilai k_{eff} .

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini disupport oleh Hibah Kelompok Riset (KeRis) Komputasi Material Terapan tahun 2021, Universitas Jember. Penulis mengucapkan terimakasih untuk LP2M Universitas Jember atas pendanaan melalui Hibah Kelompok Riset (KeRis) 2021.

Daftar Pustaka

- [1] Saputra A., Penertiban Tambang Batuan Ilegal di Kabupaten Rejang Lebong Provinsi Bengkulu, Ilmu Hukum, Universitas Andalas, Padang, 2017.
- [2] Peryoga, Y, Madi, E., dan Pranoto, A, Mengenal pembangkit Listrik Tenaga Nuklir, Jakarta : Kementrian Riset dan Teknologi, pp. 20-40, 2007.
- [3] Subkhi, M. N., Su'ud, Z., A. Waris., dan S. Permana, Studi Desain Reaktor Air Bertekanan (PWR) Berukuran Kecil Berumur Panjang Berbahan Bakar Thorium, Jurnal Istek, vol. 9, no.1, pp. 32-49, 2015.
- [4] Nurmawan A., Suroso., dan Tanujaya H., Analisis Perbandingan Kinerja Perangkat Bahan Bakar PLTN Tipe PWR AP 1000 dan PWR 1000 Mwe Tipikal dengan Menggunakan Program Komputer, J. POROS, vol. 12, no. 1, pp. 1-9, 2014.
- [5] Trianti N., Su'ud Z., dan Riyana E. S., Designed Study of Thorium Cycle Based Long Life Modular Boiling Water Reactors, Indonesian Journal of Physics, vol. 22, no.4, 2011.
- [6] Trianti N., Su'ud Z., dan Riyana E. S., Design Study of Thorium-232 and Protactinium-231 Based Fuel for Long Life BWR, American Institute of Physics Conference Proceedings 1448, pp. 96-100, 2011.
- [7] Trianti N., Su'ud Z., dan Riyana E. S., "Design Study of Thorium Cycle Based Long Life Modular Boiling Water Reactors, Indonesian Journal of Physics, vol. 22, no.4, pp. 133-137, 2012.
- [8] Trianti, N., Su'ud Z., Arif, I., dan Riyana, E. S., Preliminary Design Study of Small Long Life Boiling Water Reactor (BWR) with Tight Lattice Thorium Nitride Fuel, International Conference on Advanced Nuclear Science and Technology (ICANSE), 2013.
- [9] Trianti, N., Su'ud, Z., dan Riyana, E. S., Neutronic Performance of Small Long Life Boiling Water Reactor Using Thorium as Fuel and the Addition of Protactinium as Burnable Poisons, Advanced Materials Research, vol. 722, pp. 495-500, 2013.
- [10] Trianti, N., Su'ud, Z., Arif, I., Permana, S. dan Riyana, E. S., Power Flattering on Design Study of Small Long-Life Boiling Water Reactor (BWR) with Tight Lattice Thorium Nitride Fuel, Applied Mechanics and Materials, vol. 751, pp. 257-262, 2015.
- [11] Haas, D., The Gas Fast Reactor System, Gen-IV International Forum Symposium, San Diego, 4-13, 2012.
- [12] Tsuchihashi, K., Takano, H., Horikami, K., Ishiguro, Y., Kaneko, K., dan Hara, T., SRAC : JAERI Thermal Reactor Standard Code System For Reactor Design and Analysis, Japan : Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), 1983.
- [13] Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Tsuchihashi, K., SRAC (Ver.2002) : The Comprehensive Neutronics Calculation Code System, Japan : Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), 2002.
- [14] Syarifah, R. D., Su'ud, Z., Basar, K. dan Irwanto, D., Actinide Minor Addition on Uranium Plutonium Nitride Fuel for Modular Gas Cooled Fast Reactor, Journal of Physics : Conference Series 1493, pp. 1-6, 2020.
- [15] Syarifah, R. D., dan Su'ud, Z., The prospect of uranium nitride (UN) and mixed nitride fuel (UN-PuN) for pressurized water reactor, AIP Conference Proceedings 1677, 120005; doi: 10.1063/1.4930788, 2015.
- [16] Syarifah, R.D., Prospect of Uranium Nitride for Pressurized Water Reactor, Thesis: Department of Physics, Institut Teknologi Bandung, 2014
- [17] Lestari, M. A. dan Fitriyani, D., Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC, dan MOX Terhadap Nilai Breeding Ratio Pada Reaktor Pembangkit Cepat, Jurnal Fisika Unand, vol. 3, no. 1, pp. 14-19, 2014.
- [18] Zweifel P. F., Reactor Physics, USA : McGraw-Hill, 1973.