

Efek Penambahan Protaktinium-231 (Pa-231) pada Nilai Faktor Multiplikasi Efektif Reaktor PWR Berbahan Bakar ThN-U233N

Effect of Protactinium-231 (Pa-231) Addition on Effective Multiplication Factor Value of ThN-U233N Fueled PWR Reactor

Meirita Dwi Afriani¹, Ratna Dewi Syarifah^{1*}, Fajri Prasetya¹, Wenny Maulina¹

¹Jurusan Fisika, Universitas Jember, Jember, Indonesia

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

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui persentase penambahan protaktinium-231 yang optimum pada reaktor tipe PWR berbahan bakar ThN-U233N. Pada ThN-U233N, digunakan uranium-233 sebagai material fisilnya. Pa-231 sebagai *burnable poison* ditambahkan ke dalam bahan bakar ThN-U233N untuk menurunkan nilai k_{eff} . Pada penelitian ini dilakukan *benchmarking* nilai k_{eff} kode OpenMC dan SRAC, konfigurasi teras homogen dan heterogen, serta penambahan Pa-231 dalam bahan bakar ThN-U233N. Analisis neutronik dilakukan menggunakan kode OpenMC. Pada konfigurasi teras homogen, persentase pengayaan U-233 divariasikan sebesar 1%-15%. Sedangkan, konfigurasi teras heterogen menggunakan 3 variasi ring geometri dan bahan bakar. Hasil *benchmarking* nilai k_{eff} kode OpenMC dan SRAC menunjukkan *error* maksimum 1,906%. Konfigurasi teras homogen menghasilkan nilai optimum pada pengayaan U-233 sebesar 3%. Sedangkan, nilai optimum konfigurasi teras heterogen tercapai pada ring geometri F1 = F2 = F3 = 3 ring dengan pengayaan U-233 pada F1 = 0,5%, F2 = 3%, F3 = 5,5% serta penambahan Pa-231 sebesar 1,5%. Perhitungan optimasi ini menghasilkan *excess reactivity* maksimum sebesar 8,37%.

Kata Kunci: OpenMC; Protaktinium-231; PWR; ThN-U233N

ABSTRACT

This study aims to determine the optimum percentage of addition of protactinium-231 in a ThN-U233N fueled PWR reactor. In ThN-U233N, uranium-233 is used as the fissile material. Pa-231 as burnable poison is added to ThN-U233N fuel to reduce the k_{eff} value. In this research conducted benchmarking k_{eff} values of OpenMC and SRAC codes, homogeneous and heterogeneous core configurations, and the addition of Pa-231 in ThN-U233N fuel. Neutronic analysis was performed using the OpenMC code. In the homogeneous core configuration, the enrichment percentage of U-233 is varied by 1%-15%. Meanwhile, the heterogeneous core configuration uses 3 variations of ring geometry and fuel. The results of the benchmarking of the OpenMC and SRAC code k_{eff} values show a maximum error of 1,906%. The homogeneous core configuration produces the optimum value for U-233 enrichment of 3%. Meanwhile, the optimum value of the heterogeneous core configuration is achieved in ring geometry F1 = F2 = F3 = 3 rings with enrichment of U-233 at F1 = 0,5%, F2 = 3%, F3 = 5,5% and addition of Pa-231 of 1,5%. The optimum calculation results has an excess reactivity value 8,37%.

Keyword: OpenMC; Protactinium-231; PWR; ThN-U233N

PENDAHULUAN

Pertambahan jumlah penduduk serta pertumbuhan ekonomi menyebabkan kebutuhan akan energi listrik semakin mengalami peningkatan (Suhaemi, 2016). Oleh karena itu,

diperlukan ketersediaan energi listrik yang memadai (Koloay et al., 2018). Saat ini, pemenuhan energi listrik di Indonesia masih mengandalkan sumber energi dari batubara, gas alam, dan minyak bumi. Cadangan sumber energi tersebut semakin lama akan habis seiring

dengan penggunaannya yang terus meningkat (Gunoto & Sofyan, 2020). Sumber energi terbarukan seperti air, angin, dan matahari belum dapat memenuhi kebutuhan energi listrik Indonesia dari segi kapasitasnya. Sedangkan, pada tahun 2025 diperkirakan kebutuhan energi listrik Indonesia akan meningkat menjadi tiga kali lipat daripada kebutuhan listrik saat ini (Sari et al., 2022).

Energi nuklir yang ramah lingkungan dan berintensitas tinggi dapat dijadikan sebagai alternatif dalam mengantisipasi makin menipisnya ketersediaan batubara, gas alam, dan minyak bumi untuk bahan bakar pembangkit listrik (Suhaemi, 2016). Pada tahun 2011, tenaga nuklir menyediakan 10% listrik dunia. Pada tahun 2007, IAEA (*International Atomic Energy Agency*) melaporkan terdapat 439 reaktor tenaga nuklir yang telah beroperasi di 31 negara (Syarifah & Suud, 2015).

Reaktor air bertekanan atau *pressurized water reactor* (PWR) merupakan reaktor nuklir termal yang saat ini paling banyak dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). PWR memanfaatkan air ringan (H_2O) untuk digunakan sebagai moderator dan pendingin (Subkhi et al., 2015). PWR awalnya dikembangkan oleh *Westinghouse Bettis Atomic Power Laboratory* sebagai penggerak kapal selam (Syarifah, Sari, et al., 2022). *Westinghouse Nuclear Power Division*-lah yang kemudian mengawali pembuatan PWR komersial (Subkhi et al., 2015). PWR telah banyak digunakan sebagai pembangkit listrik di beberapa negara seperti Amerika Serikat, Prancis, China, Korea Selatan, serta Jepang (Rajagukguk et al., 2021).

Reaksi fisi merupakan reaksi pembelahan inti atom akibat bertumbukan dengan neutron (Athiqoh et al., 2014). Reaksi fisi menghasilkan beberapa inti atom baru yang memiliki massa lebih kecil, dua sampai tiga neutron, dan energi sekitar 200 MeV (Irfan et al., 2020). Pada PWR, reaksi fisi berlangsung dalam reaktor dimana

tekanannya dijaga pada kondisi tinggi (Diby, 2007).

PWR mempunyai dua sistem pendingin, yaitu sistem pendingin primer dan pendingin sekunder. Sistem pendingin primer memiliki fase cair dan tekanan tinggi. Sistem pendingin primer berfungsi sebagai media untuk mentransfer energi kalor dari reaktor dan menjaga produk fisi supaya tetap berada di dalam sistem ini. Sedangkan, sistem pendingin sekunder memiliki fase pendidihan pada bagian pembangkit uapnya yang menghasilkan aliran uap untuk diteruskan menuju turbin guna diubah menjadi energi mekanik. Generator turbin kemudian mengubah energi mekanik menjadi energi listrik (Diby, 2007).

PWR yang sudah dikomersialkan sebagian besar menggunakan uranium sebagai bahan bakar utamanya. Sedangkan, sumber daya thorium jumlahnya lebih besar dibandingkan uranium (Syarifah et al., 2022). Selain itu, thorium juga lebih aman digunakan dibanding uranium karena tidak menghasilkan Pu-240 yang dapat digunakan sebagai bahan baku senjata nuklir (Ngadenin et al., 2014).

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka pada penelitian ini akan diteliti reaktor tipe *pressurized water reactor* (PWR) berbahan bakar ThN-U233N. Pada ThN-U233N digunakan thorium-232 (Th-232) yang merupakan material fertil yang tidak dapat berfisi. Penambahan uranium-233 sebagai campuran bahan bakar memungkinkan terjadinya reaksi fisi karena tersusun dari U-233 yang merupakan material fisil. Protaktinium-231 (Pa-231) sebagai *burnable poison* ditambahkan ke dalam bahan bakar ThN-U233N. Pa-231 disebut sebagai pemancar radiasi alfa dan dihasilkan dari proses peluruhan U-235. Pa-231 merupakan isotop yang paling stabil pada reaksi peluruhan dengan waktu paruh sekitar 32760 tahun jika dibandingkan dengan isotop protaktinium lainnya, sehingga cocok digunakan sebagai material *burnable poison*.

Burnable poison memiliki tampang lintang serapan tinggi menyebabkan neutron dapat diserap lebih cepat. Jumlah neutron yang semakin berkurang mengakibatkan terjadinya reaksi fisi semakin menurun, sehingga dapat menurunkan nilai k_{eff} (Ardianingrum, 2022).

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui variasi penambahan Pa-231 yang paling optimum pada reaktor PWR berbahan bakar ThN-U233N. Penelitian ini dilakukan menggunakan program OpenMC dengan *data library* ENDF/B.VIII.0. OpenMC merupakan kode simulasi transportasi partikel Monte Carlo (Putri et al., 2022). Metode Monte Carlo mensimulasikan setiap peristiwa probabilistik tunggal yang terjadi di dalam suatu proses secara berurutan (Shafii, 2013). OpenMC telah difokuskan untuk perhitungan kekritisan yang diterapkan pada simulasi reaktor nuklir (Romano & Forget, 2013). OpenMC bersifat *open source* yang memungkinkan setiap pengguna untuk menyalin, memodifikasi, bahkan mendistribusikan ulang kode tanpa biaya (Romano et al., 2014).

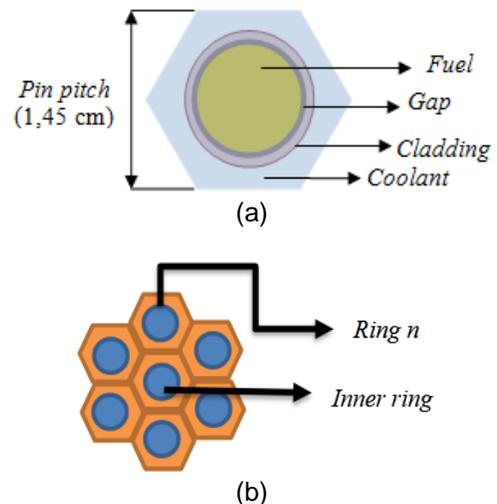
METODE PENELITIAN

Desain reaktor dan bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1, Gambar 1, dan Gambar 2.

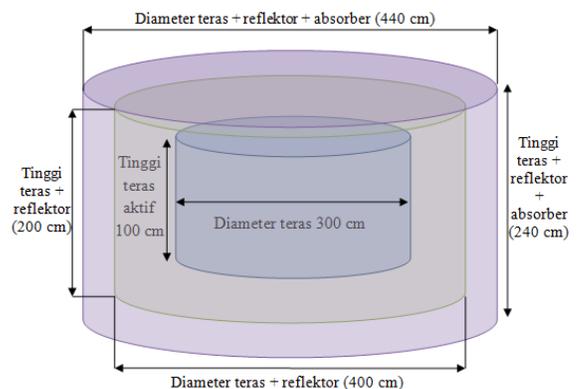
Tabel 1. Spesifikasi Desain Reaktor

Parameter	Spesifikasi
Daya	300 MWth
Periode <i>refueling</i>	5 tahun
Bahan bakar	ThN-U233N
Geometri pin bahan bakar	Heksagonal
Persentase U-233	1% - 15%
Persentase Pa-231	1% - 5%
Fraksi volume	
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	60%
<i>Gap</i>	0,5%

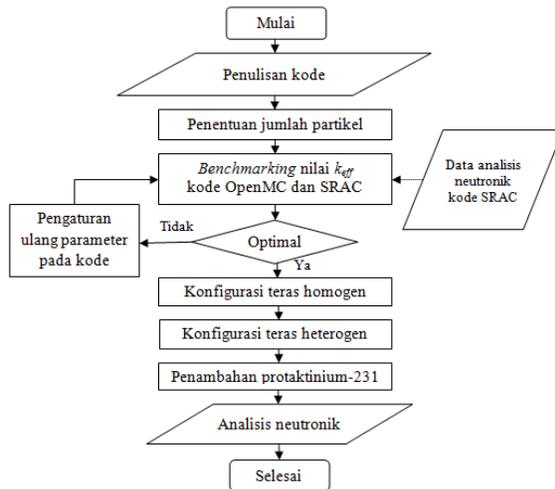
Selongsong (<i>cladding</i>)	10%
Pendingin (<i>coolant</i>)	29,5%
Jumlah pin dalam 1 <i>assembly</i>	127
Jumlah <i>assembly</i>	217
Diameter teras aktif	300 cm
Tinggi teras aktif	100 cm



Gambar 1. Pin Bahan Bakar (a) Ukuran pin heksagonal bahan bakar, dan (b) Konfigurasi ring geometri pin heksagonal bahan bakar



Gambar 2. Desain Teras Reaktor



Gambar 3. Prosedur Penelitian

Setelah permasalahan dirumuskan, kemudian melakukan simulasi desain reaktor nuklir menggunakan program OpenMC. Prosedur penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3 menjelaskan mengenai urutan langkah-langkah dalam penelitian ini.

Penentuan jumlah partikel

Penentuan jumlah partikel dilakukan dengan mensimulasikan reaktor PWR berbahan bakar ThN-U233N menggunakan kode OpenMC dengan variasi partikel dari 1.000 - 55.000 partikel. Pada penentuan jumlah partikel ditentukan grafik stabil nilai k_{eff} yang kemudian digunakan sebagai parameter untuk pengambilan data pada penelitian ini.

Benchmarking nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) kode OpenMC dan SRAC

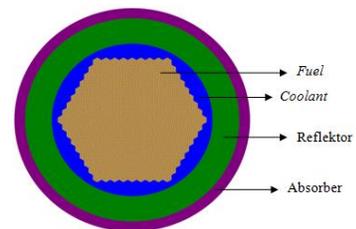
Benchmarking pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan nilai k_{eff} yang dihasilkan dari proses *burn-up* bahan bakar selama 5 tahun dari kode OpenMC dan SRAC untuk spesifikasi desain reaktor dan bahan bakar yang sama. OpenMC dan SRAC memiliki perbedaan dalam metode perhitungannya. SRAC menggunakan metode perhitungan deterministic dan

programnya bersifat *non-opensource* (berlisensi). Sedangkan untuk OpenMC menggunakan perhitungan stokastik dan memiliki program yang bersifat *opensource*, sehingga lebih mudah untuk dimodifikasi serta dapat diakses secara gratis. Dengan menggunakan perhitungan stokastik, OpenMC memiliki keunggulan yaitu *user* dapat memvariasikan jumlah partikel yang akan digunakan. Sedangkan, SRAC tidak bisa divariasikan dan jumlah partikelnya sudah ditentukan. Jumlah partikel berpengaruh pada tingkat kekritisan reaktor yang digunakan. Semakin banyak partikel yang digunakan, maka hasil kekritisan semakin akurat. Persen *error* dari *benchmarking* dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$error(\%) = \frac{[k_{OpenMC} - k_{SRAC}]}{k_{SRAC}} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Konfigurasi teras homogen

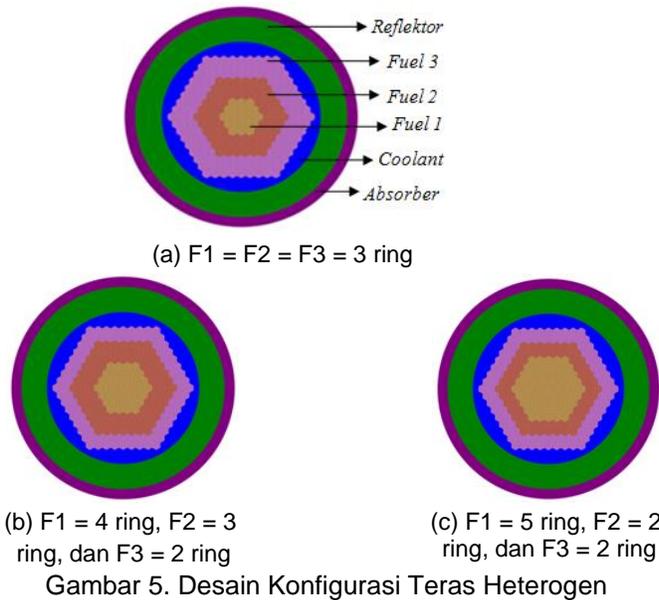
Konfigurasi teras homogen hanya menggunakan satu variasi bahan bakar dalam teras reaktor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pada penelitian ini, konfigurasi teras homogen dilakukan dengan mensimulasikan reaktor tipe PWR berbahan bakar ThN-U233N dengan variasi persentase pengayaan U-233 sebesar 1% - 15%.



Gambar 4. Desain Konfigurasi Teras Homogen

Konfigurasi teras heterogen

Pada konfigurasi teras heterogen digunakan beberapa variasi ring geometri dan bahan bakar dalam teras reaktor. Pada penelitian ini, konfigurasi teras heterogen menggunakan 3 variasi bahan bakar dan ring geometri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain Konfigurasi Teras Heterogen

Penambahan Pa-231 dalam bahan bakar ThN-U233N

Protaktinium-231 (Pa-231) sebagai *burnable poison* ditambahkan ke dalam bahan bakar ThN-U233N untuk menurunkan nilai k_{eff} . Penambahan Pa-231 pada penelitian ini divariasikan sebesar 1% - 5%.

Analisis data

Analisis data dilakukan dengan menganalisis nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dari proses *benchmarking* kode OpenMC dan SRAC, konfigurasi teras homogen dan heterogen, serta penambahan Pa-231 dalam bahan bakar ThN-U233N. Parameter data ditentukan berdasarkan rentang nilai k_{eff} dan *excess reactivity* seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2) dan (3).

$$\Delta k_{eff} = k_{eff\text{ terbesar}} - k_{eff\text{ terkecil}} \dots \dots \dots (2)$$

$$excess\ reactivity = \frac{[k_{eff} - 1]}{k_{eff}} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

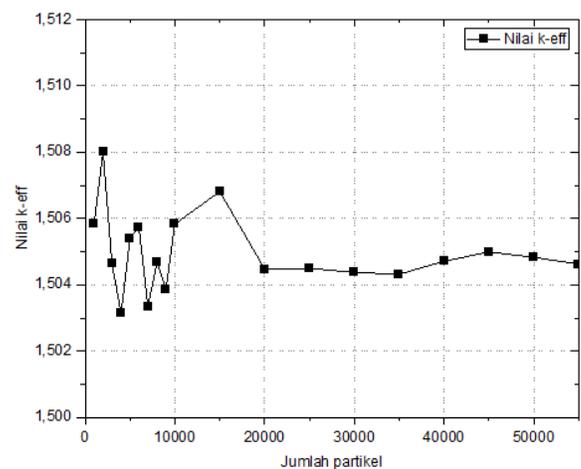
Reaktor dapat berada dalam 3 kondisi, yaitu kondisi kritis, superkritis, dan subkritis.

Kondisi kritis ($k_{eff} = 1$) terjadi ketika populasi neutron pada generasi saat ini dan generasi sebelumnya adalah sama dan reaktor dalam keadaan stabil. Kondisi superkritis ($k_{eff} > 1$) terjadi jika populasi neutron terus meningkat terhadap waktu sehingga reaktor kemungkinan dapat meledak. Kondisi subkritis ($k_{eff} < 1$) dicapai jika jumlah neutron semakin berkurang terhadap waktu, sehingga reaktor dapat segera padam. Desain optimum tercapai ketika nilai k_{eff} yang didapatkan dari hasil penelitian mendekati 1 (Athiqoh et al., 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan jumlah partikel

Gambar 6 menunjukkan variasi penentuan jumlah partikel sebesar 1.000 - 55.000 partikel pada simulasi *pressurized water reactor* (PWR) berbahan bakar ThN-U233N menggunakan kode OpenMC. Berdasarkan Gambar 6, pada rentang 50.000 partikel hasil yang didapat sudah konvergen. Oleh karena itu, jumlah partikel ini yang akan digunakan pada simulasi menggunakan OpenMC dalam penelitian ini.



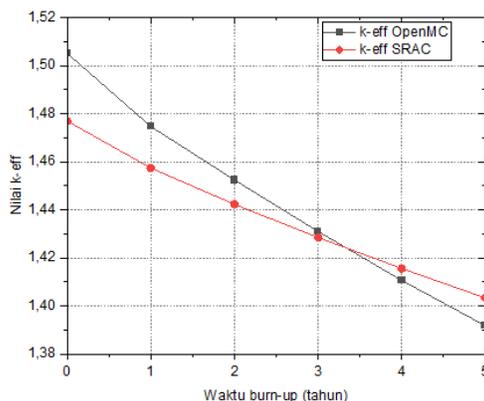
Gambar 6. Grafik Hasil Penentuan Jumlah Partikel

Benchmarking nilai k_{eff} kode OpenMC dan SRAC

Faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) merupakan perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan dari pembelahan pada generasi saat ini dengan jumlah neutron yang diserap dan mengalami kebocoran pada generasi sebelumnya (Athiqoh et al., 2014). Hasil *benchmarking* nilai k_{eff} kode OpenMC dan SRAC seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 7 yang menunjukkan *error* maksimum sebesar 1,906%. Metode *benchmarking* tidak ada batasan nilai, melainkan hanya membandingkan hasil perhitungan antar kedua program simulasi yaitu OpenMC dan SRAC.

Tabel 2. Hasil *Benchmarking* Nilai k_{eff} Kode OpenMC dan SRAC

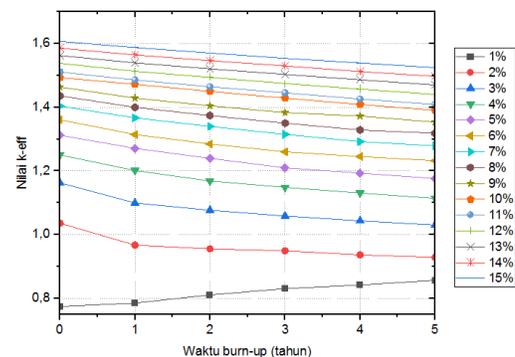
Waktu <i>burn-up</i> (tahun)	k_{eff} OpenMC	k_{eff} SRAC	<i>Error</i> (%)
0	1,50506	1,47691	1,906
1	1,47465	1,45738	1,185
2	1,45242	1,44228	0,703
3	1,43102	1,42849	0,177
4	1,41066	1,41561	0,349
5	1,39183	1,40338	0,823



Gambar 7. Grafik Hasil *Benchmarking* Nilai k_{eff} Kode OpenMC dan SRAC

Konfigurasi teras homogen

Setelah proses *benchmarking* nilai k_{eff} kode OpenMC dan SRAC selesai dilakukan, maka dilanjutkan dengan konfigurasi teras homogen. Gambar 8 menunjukkan grafik nilai k_{eff} berdasarkan variasi persentase pengayaan U-233 sebesar 1% - 15% pada bahan bakar ThN-U233N menggunakan konfigurasi teras homogen. Berdasarkan Gambar 8, persentase pengayaan U-233 yang optimum berada pada nilai 3% dengan nilai k_{eff} paling mendekati 1 yang berarti reaktor dalam kondisi stabil. Oleh karena itu, persentase pengayaan U-233 sebesar 3% digunakan sebagai acuan untuk perhitungan konfigurasi teras heterogen.



Gambar 8. Grafik Hasil Konfigurasi Teras Homogen

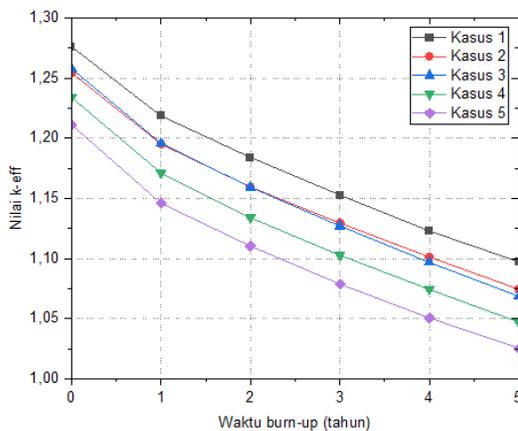
Konfigurasi teras heterogen

Perhitungan konfigurasi teras heterogen mengacu pada perhitungan teras homogen yaitu menggunakan persentase pengayaan U-233 sebesar 3% sebagai rata-rata bahan bakar. Pada penelitian ini, konfigurasi teras heterogen menggunakan 3 variasi bahan bakar yang terdiri atas *fuel* 1 (F1), *fuel* 2 (F2), dan *fuel* 3 (F3) yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan variasi ring geometri seperti pada Gambar 5.

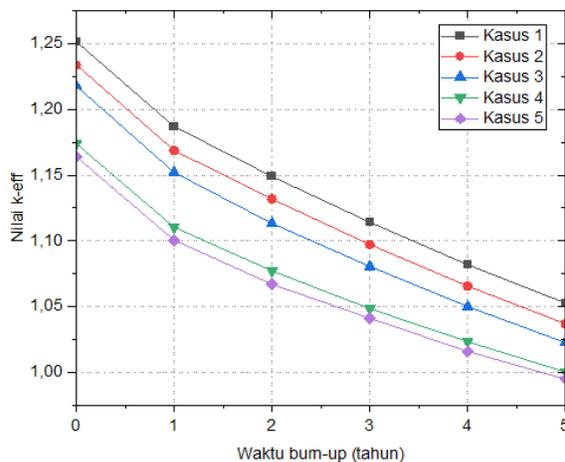
Tabel 3. Variasi Persentase Pengayaan U-233 pada Konfigurasi Teras Heterogen

Kasus ke-	Pengayaan U-233 (%)			Rata-rata
	F1	F2	F3	
1	0,5%	3%	5,5%	3%
2	1%	3%	5%	3%
3	1,5%	3%	4,5%	3%
4	2%	3%	4%	3%
5	2,5%	3%	3,5%	3%

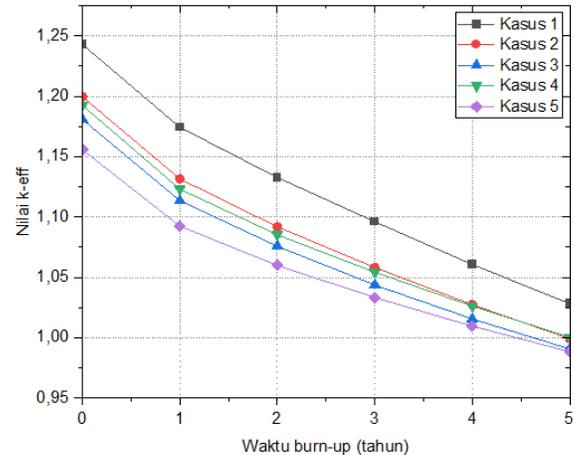
Grafik nilai k_{eff} hasil perhitungan konfigurasi teras heterogen pada desain 1 (F1 = F2 = F3 = 3 ring), desain 2 (F1 = 4 ring, F2 = 3 ring, F3 = 2 ring), dan desain 3 (F1 = 5 ring, F2 = 2 ring, F3 = 2 ring) secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 9, Gambar 10, serta Gambar 11.



Gambar 9. Grafik Hasil Konfigurasi Teras Heterogen Desain 1 (F1 = F2 = F3 = 3 Ring)



Gambar 10. Grafik Hasil Konfigurasi Teras Heterogen Desain 2 (F1 = 4 Ring, F2 = 3 Ring, F3 = 2 Ring)

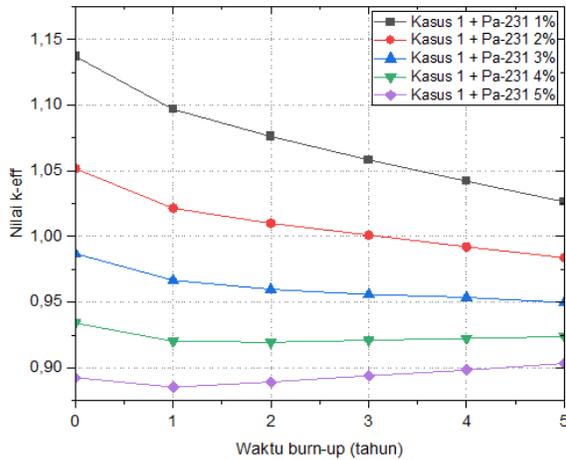


Gambar 11. Grafik Hasil Konfigurasi Teras Heterogen Desain 3 (F1 = 5 Ring, F2 = 2 Ring, F3 = 2 Ring)

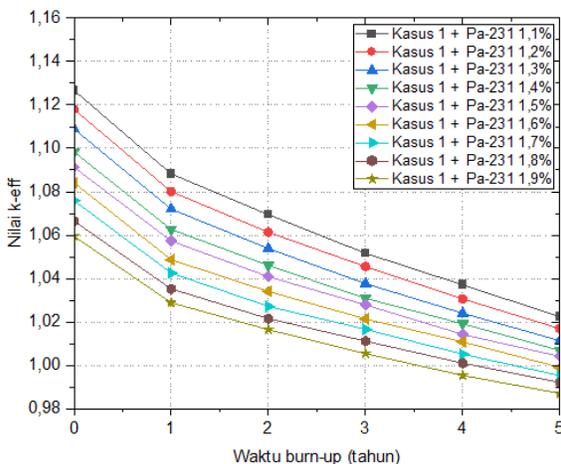
Desain optimum konfigurasi teras heterogen dicapai pada desain 1 yaitu F1 = F2 = F3 = 3 ring pada pengayaan U-233 pada F1 = 0,5%, F2 = 3%, dan F3 = 5,5%. Hasil nilai k_{eff} pada desain 1 kasus 1 ini masih relatif tinggi sehingga diperlukan penambahan *burnable poison* untuk menurunkan nilai k_{eff} .

Penambahan protaktinium-231 (Pa-231)

Burnable poison protaktinium-231 (Pa-231) ditambahkan ke dalam bahan bakar ThN-U233N untuk menurunkan nilai k_{eff} . Gambar 12 menunjukkan variasi penambahan Pa-231 sebesar 1% - 5%, sedangkan variasi sebesar 1,1% - 1,9% ditunjukkan pada Gambar 13.



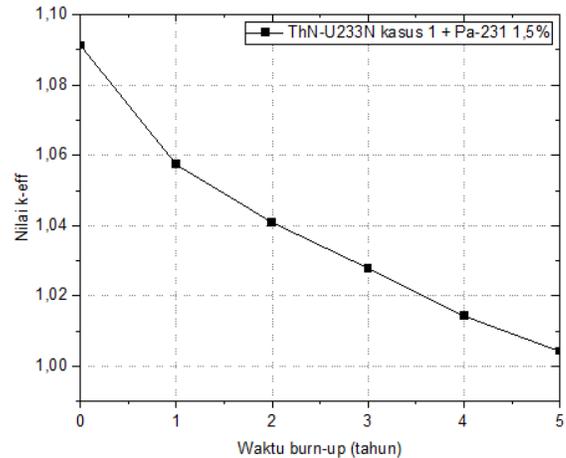
Gambar 12. Grafik Hasil Penambahan Pa-231 1% - 5% pada ThN-U233N



Gambar 13. Grafik Hasil Penambahan Pa-231 1,1% - 1,9% pada ThN-U233N

Penambahan Pa-231 sebesar 1,5% menghasilkan nilai paling optimum dengan nilai k_{eff} paling mendekati 1 yang mampu menurunkan maksimum nilai k_{eff} dari 1,27611 menjadi 1,09130 dan menghasilkan *excess reactivity* maksimum 8,37% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14. Semakin kecil nilai *excess reactivity*, maka tingkat kekritisan reaktor juga lebih aman dan stabil (tidak superkritis). Nilai *excess reactivity* tidak ada batasan, yang terpenting reaktor harus dalam kondisi *steady state* (stabil) dan harapannya

desain reaktor yang aman memiliki nilai *excess reactivity* sekecil mungkin agar tidak superkritis.



Gambar 14. Hasil Optimasi pada ThN-U233N

Hasil optimasi menunjukkan bahwa material Pa-231 memiliki karakteristik dapat menurunkan nilai reaktivitas lebih reaktor hingga akhir pembakaran karena mempunyai nilai penampang lintang penyerapan (*cross section absorbtion*) yang tinggi. Pa-231 menangkap dan menyerap neutron sehingga akan menurunkan nilai k_{eff} hingga lebih stabil (mendekati nilai 1).

KESIMPULAN

Desain optimum reaktor tipe *pressurized water reactor* (PWR) berbahan bakar ThN-U233N tercapai pada ring geometri $F1 = F2 = F3 = 3$ ring dengan pengayaan U-233 pada $F1 = 0,5\%$, $F2 = 3\%$, dan $F3 = 5,5\%$. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa desain yang paling stabil yang ditinjau secara neutronik yaitu pada penambahan protaktinium-231 (Pa-231) dengan persentase 1,5%. Nilai k_{eff} yang dihasilkan sebesar 1,09130 dan menghasilkan nilai *excess reactivity* maksimum sebesar 8,37%. Oleh karena itu, desain tersebut dapat digunakan sebagai acuan dalam pembangunan PLTN dengan tipe reaktor PWR di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardianingrum, A. (2022). Perbandingan Nilai Faktor Multiplikasi dan Densitas Daya pada PWR Berbahan Bakar Th(U-233)N, Th(U-233)C, dan Th(U-233)O₂ Menggunakan Kode SRAC-COREBN 2D. *Skripsi*. Universitas Jember.
- Athiqoh, F., Budi, W. S., Anam, C., & Tjiptono, T. W. (2014). Distribusi Fluks Neutron sebagai Fungsi Burn-Up Bahan Bakar pada Reaktor Kartini. *Youngster Physics Journal*, 3(2), 107–112.
- Dibyso, S. (2007). Studi Karakteristik Pressurizer pada PWR. *Prosiding PPI - PDIPTN*, 179–185.
- Gunoto, P., & Sofyan, S. (2020). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya 100 Wp untuk Penerangan Lampu di Ruang Selasar Fakultas Teknik Universitas Riau Kepulauan. *Sigma Teknika*, 3(2), 96–106. <https://doi.org/10.33373/sigma.v3i2.2754>
- Irfan, M., Bura, R. O., & Wahyudi, D. (2020). Konsep Teknologi Reaktor Nuklir sebagai Sistem Propulsi Kapal Perang Logistik Landing Platform Dock. *Teknologi Daya Gerak*, 3(1), 1–24. <http://jurnalprodi.idu.ac.id/index.php/TDK/article/view/533>
- Koloay, A. C., Tumaliang, H., & Pakiding, M. (2018). Perencanaan dan Pemenuhan Kebutuhan Energi Listrik di Kota Bitung. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 7(3), 285–294.
- Ngadenin, Syaeful, H., Widana, K. S., & Nurdin, M. (2014). *Eksplorium Potensi Thorium dan Uranium di Kabupaten Bangka Barat Potency of Thorium and Uranium*. 35(2), 69–84.
- Putri, C. D., Manado, F., & Ariani, M. (2022). Analisis Neutronik Kekritisitas Teras Reaktor Nuscale Berbahan Bakar UO₂ dengan Menggunakan Software OpenMC. *JoP*, 8(1), 43–50.
- Rajagukguk, S. P., Bakhri, S., & Surbakti, T. (2021). Perhitungan Inventori Nuklida pada Pin Bahan Reaktor PWR. *Sigma Epsilon*, 25(2), 92–102.
- Romano, P. K., & Forget, B. (2013). The OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code. *Annals of Nuclear Energy*, 51, 274–281.
- Romano, P. K., Horelik, N. E., Herman, B. R., Nelson, A. G., Forget, B., & Smith, K. (2014). *OpenMC: A State-of-the-Art Monte Carlo Code for Research and Development*. 06016. <https://doi.org/10.1051/snmc/201406016>
- Sari, A. K., Syarifah, R. D., & Arkundato, A. (2022). Preliminary study of 300 MWth pressurized water reactor with carbide fuel with addition neptunium 237 using SRAC-COREBN code. *AIP Conference Proceedings*.
- Shafii, M. A. (2013). Beberapa Metode Penyelesaian Persamaan Transport Neutron dalam Reaktor Nuklir. *Jurnal Ilmu Dasar*, 14(2), 59–65.
- Subkhi, M. N., Su'ud, Z., Waris, A., & Permana, S. (2015). Studi Desain Reaktor Air Bertekanan (PWR) Berukuran Kecil Berumur Panjang Berbahan Bakar Thorium. *Jurnal ISTEK*, 9(1), 32–49.
- Suhaemi, T. (2016). Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Menopang Kebutuhan Eenergi Listrik Nasional. *Seminar Nasional TEKNOKA_FT UHAMKA*, 1, 162–170. <https://journal.uhamka.ac.id/index.php/teknoka/article/view/809>
- Syarifah, R. D., Aula, M. H., Ardianingrum, A., Janah, L. N., & Maulina, W. (2022). Comparison of Thorium Nitride and Uranium Nitride Fuel on Small Modular Pressurized Water Reactor in Neutronic Analysis Using SRAC Code. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8–116), 21–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255849>
- Syarifah, R. D., Sari, A. K., Arkundato, A., Irwanto, D., & Su'ud, Z. (2022). Neutronics Analysis of UN-PuN Fuel for 300 MW Pressurized Water Reactor Using SRAC-COREBN Code. *Eureka: Physics and Engineering*, 6(43).
- Syarifah, R. D., & Suud, Z. (2015). The prospect of uranium nitride (UN) and mixed nitride fuel (UN-PuN) for pressurized water reactor. *AIP Conference Proceedings*, 1677, 1–5.



JIFP

(Jurnal Ilmu Fisika dan Pembelajarannya)
<http://jurnal.radenfatah.ac.id/index.php/jifp/index>
Vol. VII, No. II, DESEMBER 2023, 23 - 32

ISSN (online):
2549-6158

ISSN (print):
2614-7467

<https://doi.org/10.1063/1.4930788>