Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 15, No. 3, Mei 2026, hal.331 – 338
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.15.3.331-338.2026

Open Access

Studi tentang Pengaruh Variasi Bahan Bakar MOX terhadap Siklus Operasi Reaktor Nuscale

Lola Febryandini Hasibuan[1], Helen Raflis[2], Dian Fitriyani[1,*]
[1]Laboratorium Teori dan Nuklir, Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia
[2]Badan Pengawas Tenaga Nuklir,
Jakarta Pusat, 10120, DKI Jakarta

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 8 Desember 2025
Direvisi: 16 Maret 2026
Diterima: 30 Juni 2026

Kata kunci:
NuScale
MOX
OpenMC
Siklus Operasi Reaktor

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi bahan bakar *Mixed Oxide* (MOX) terhadap siklus operasi reaktor NuScale. Variasi bahan bakar MOX yang digunakan meliputi monoThPu, monoUPu, multiUPu, multiThUPu, dan multiThU_2, dengan fokus pada perubahan komposisi isotopik plutonium, uranium, dan thorium. Pemodelan dilakukan menggunakan kode OpenMC berbasis metode Monte Carlo dengan pustaka data nuklir ENDF/B-VIII.0. Modifikasi desain teras dilakukan pada *batch* A-01 dengan mengganti bahan bakar uranium standar menjadi variasi MOX tanpa gadolinia. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi MOX berada pada kondisi superkritis di awal siklus ($k_{eff} > 1$) dan mengalami penurunan bertahap hingga mencapai batas refueling ($k_{eff} \geq 0{,}95$). Variasi bahan bakar monoThPu, monoUPu, multiUPu, dan multiThUPu mampu mempertahankan kondisi kritis hingga siklus operasi 24 bulan, sedangkan multiThU_2 hanya mencapai 16 bulan. Bahan bakar dengan fraksi isotop fisil tinggi seperti Pu-239 dan Pu-241 menghasilkan distribusi fluks neutron yang lebih tajam di pusat teras, sementara dominasi Th-232 pada multiThU_2 menghasilkan fluks yang lebih merata. Nilai *Power Peaking Factor* (PPF) berada dalam batas aman desain termal (PPF < 1,3).

Keywords:
NuScale
MOX
OpenMC
Reactor Operational Cycle

Penulis Korespondensi:
Dian Fitriyani
Email: dianfitriyani@sci.unand.ac.id

This study analyzes the effect of Mixed Oxide (MOX) fuel variations on the operational cycle of the NuScale reactor. The MOX fuel variations used include monoThPu, monoUPu, multiUPu, multiThUPu, and multiThU_2, with a focus on changes in the isotopic composition of plutonium, uranium, and thorium. The modeling was performed using the OpenMC code based on the Monte Carlo method with the ENDF/B-VIII.0 nuclear data library. A core design modification was made in Batch A-01 by replacing the standard uranium fuel with MOX variations without gadolinia. The simulation results show that all MOX configurations are supercritical at beginning of the cycle ($k_{eff} > 1$) and gradually decrease to the refueling limit ($k_{eff} \geq 0{,}95$). The monoThPu, monoUPu, multiUPu, and multiThUPu fuels can maintain criticality for up to 24 months of operation, whereas multiThU_2 achieves only 16 months. Fuels with higher fissile isotope fractions, such as Pu-239 and Pu-241, produce sharper neutron flux distributions at the core center, while the dominance of Th-232 in multiThU_2 results in a more uniform flux profile. The Power Peaking Factor (PPF) values remain within the thermal design safety limit (PPF < 1.3).

Copyright © 2026 Author(s)

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi bersih dan berkelanjutan mendorong pengembangan teknologi reaktor nuklir generasi baru yang lebih efisien dan aman. Salah satu pendekatan yang menonjol adalah penggunaan *Small Modular Reactor* (SMR), yaitu reaktor dengan kapasitas daya kecil hingga menengah yang dapat diproduksi secara modular dan dioperasikan secara fleksibel (IAEA, 2024; Locatelli dkk., 2014; Mignacca & Locatelli, 2020). Reaktor NuScale merupakan desain SMR berbasis *Presurre Water Reactor* (PWR) yang pertama kali mendapatkan lisensi desain dari *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) (NuScale Power LLC, 2023b). Reaktor ini terdiri dari beberapa modul untuk menghasilkan listrik, dimana satu modul NuScale sering dikenal dengan sebutan *NuScale Power Modul* (NPM). NPM memanfaatkan sistem pendinginan alami, struktur kompak, dan sistem keselamatan pasif (NuScale Power LLC, 2022; Schlegel & Bhowmik, 2023).

Efisiensi operasi reaktor sangat dipengaruhi oleh panjang siklus bahan bakar. Siklus operasi yang panjang dapat menurunkan frekuensi pengisian ulang bahan bakar, menghemat biaya operasional, serta mengurangi paparan radiasi pekerja (IAEA, 2023; World Nuclear Association, 2025). Untuk mencapai hal tersebut, diperlukan strategi manajemen bahan bakar yang efektif melalui optimasi komposisi isotopik dan konfigurasi teras reaktor. Salah satu pendekatan yang menarik adalah penggunaan *Mixed Oxide* (MOX), yaitu bahan bakar nuklir yang terbuat dari plutonium bahan bakar sisa dicampur dengan uranium terdeplesi (*depleted uranium*). Dengan menggunakan plutonium sisa, MOX memungkinkan pemanfaatan kembali sebagian dari bahan bakar yang telah terpakai (*spent fuel*), daripada langsung dibuang sebagai limbah tinggi radioaktivitas (World Nuclear Association, 2017).

Berbagai studi telah membuktikan bahwa penggunaan bahan bakar alternatif selain UO_2 pada reaktor PWR dapat dilakukan tanpa menurunkan kinerja reaktor. Betancourt dkk. (2021) menunjukkan bahwa penerapan MOX pada sepertiga teras iPWR mampu mencapai siklus hingga 48 bulan, mempertahankan distribusi daya yang lebih merata, serta menjaga koefisien reaktivitas suhu dalam batas aman. Penggunaan bahan bakar seperti $(U,Th)O_2$ dan $(Pu,Th)O_2$ sebagai *seed-blangket* pernah dilakukan pada teras NPM oleh Gonçalves dkk. (2024). Konversi bahan bakar di teras NPM ke dalam model *seed-blanket* menghasilkan teras yang kritis, distribusi panas yang lebih merata, dan koefisien suhu moderator yang lebih negatif dari desain standar sehingga meningkatkan margin keselamatan termal-hidrolik.

Sementara itu, Amatullah dkk. (2024) melakukan pemanfatan siklus bahan bakar thorium pada reaktor iPWR dengan menggunakan desain teras NPM. Penelitian ini membandingkan tiga jenis bahan bakar, yaitu $(U235-U238)O_2$ untuk siklus bahan bakar uranium, $(U235-Th232)O_2$ untuk siklus transisi uranium-thorium, dan $(U233-Th232)O_2$ untuk siklus bahan bakar thorium penuh. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan thorium menghasilkan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dan rasio konversi yang lebih baik dibandingkan dengan siklus berbahan bakar uranium murni.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, studi ini berfokus pada modifikasi konfigurasi desain teras NPM dengan mengganti bahan bakar uranium standar pada *batch*-A01 menjadi variasi bahan bakar MOX tanpa gadolinia. Variasi yang diteliti meliputi lima jenis komposisi MOX, yaitu monoThPu, monoUPu, multiUPu, multiThUPu, dan multiThU_2. Beberapa parameter neutronik seperti faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), reaktivitas, distribusi fluks neutron, dan *Power Peaking Factor* (PPF) dianalisis terhadap variasi bahan bakar MOX dengan tujuan dapat memperpanjang siklus operasi reaktor, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar dan mengurangi jumlah bahan bakar bekas. Perhitungan dan simulasi dilakukan menggunakan simulasi OpenMC dengan data nuklir ENDF/B-VIII.0. Melalui pendekatan ini dapat diperoleh komposisi bahan bakar jenis MOX yang lebih optimal dalam memperpanjang siklus operasi pada reaktor NuScale tanpa mengorbankan peforma neutronik dan desain keselamatan termal.

II. METODE

Pemodelan teras reaktor yang digunakan mengacu pada *General Design Criterion* (GDC) dari desain standar reaktor Nuscale (NuScale Power LLC, 2023a). Semua parameter di dalam teras NPM akan didefinisikan di dalam bagian *input* OpenMC menggunakan format *Extensible Markup Language* (XML). Proses pemodelan meliputi tahap spesifikasi material berdasarkan komposisi isotop, penyusunan geometri teras, pengaturan kondisi batas, dan pengaturan parameter simulasi. Deskripsi konfigurasi teras aktif yang menjadi dasar dalam pelaksanaan simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

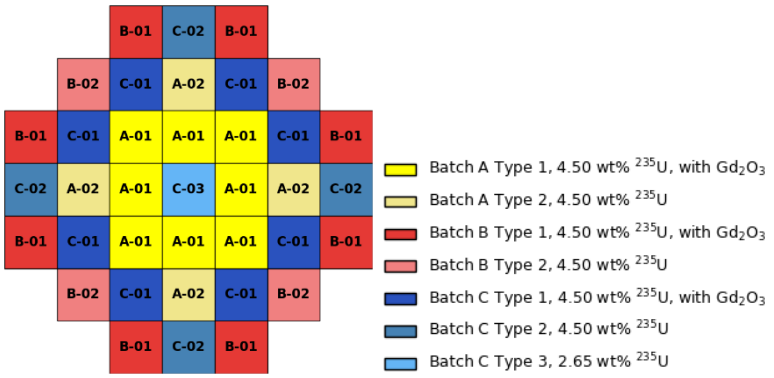
Tabel 1 Deskripsi Teras Aktif NPM

Parameter	Nilai
Teras	
Diameter teras aktif (cm)	150,6
Tinggi teras aktif (cm)	238,76
Fuel Assembly	
Jumlah FA	37
Susunan *fuel pin*	17 × 17
Jumlah *fuel rod*	264
Jumlah *guide tube*	24
Jumlah *instrumentation*	1
Pitch FA	21,42
Fuel rods	
Tinggi *fuel* (cm)	200
Dimater luar *cladding* (cm)	0,95
Diameter dalam *cladding* (cm)	0,828
Pitch fuel rods	1,26
Fuel pellet	
Diameter (cm)	0,812
Panjang (cm)	1,016
Guide tubes; instrumentation	
Diameter luar (cm)	0,612
Diameter dalam (cm)	0,535

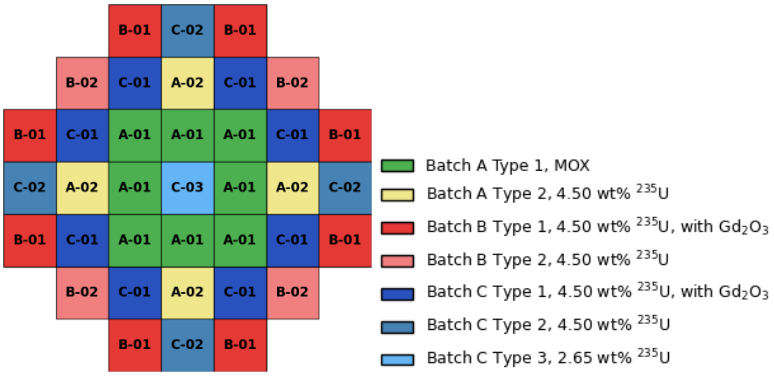
(Sumber: NuScale Power LLC, 2023a)

II.1 Modifikasi Desain Teras

Setiap FA NPM memiliki pola penyusunan yang didasarkan pada jumlah siklus operasi yang telah dilalui di teras, yaitu *twice burned fuel* (*Batch* A), *once burned fuel* (*Batch* B), dan *fresh fuel* (*Batch* C) yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Susunan FA standar NPM



Gambar 2 Susunan FA NPM dengan MOX

Dalam penelitian ini dilakukan modifikasi desain teras dengan mengganti bahan bakar UO_2 di *batch* A-01 dari desain FA standar dengan variasi lima jenis bahan bakar MOX tanpa gadolinia seperti Gambar 2. Komposisi bobot massa MOX yang akan digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

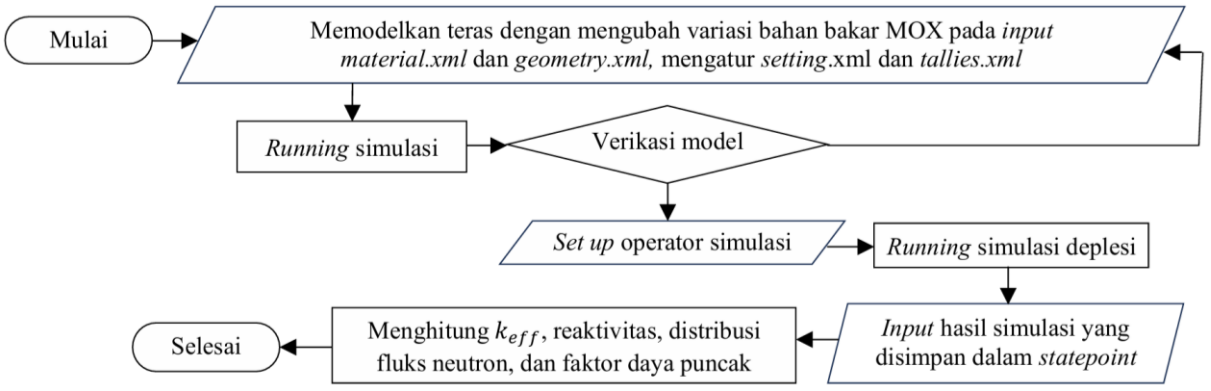
Tabel 2 Komposisi Isotopik MOX

MOX	Th (%)	U (%)		Pu (%)		Jumlah FA
MonoThPu	86,86	0		13,14		8
				Pu 238	2,7	
				Pu 239	51,05	
				Pu 240	24,22	
				Pu 241	12,80	
				Pu 242	7,30	
MonoUPu	0	87,87		12,13		8
		U 235	0,20	Pu 238	2,7	
		U 238	99,8	Pu 239	51,05	
				Pu 240	24,22	
				Pu 241	12,80	
				Pu 242	7,30	
MultiUPu	0	75,86		24,14		8
		U 235	0,20	Pu 238	4,19	
		U 238	99,80	Pu 239	31,78	
				Pu 240	29,42	
				Pu 241	9,83	
				Pu 242	23,80	
MultiThUPu	81,28	5,00		13,72		8
		U 232	0,21	Pu 238	5,58	
		U 233	52,59	Pu 239	23,91	
		U234	26,45	Pu 240	24,51	
		U 235	11,69	Pu 241	11,16	
		U 236	9,03	Pu 242	33,80	
MultiThU_2	93,03	6,97		0		8
		U 232	0,31			
		U 233	49,79			
		U 234	29,63			
		U 235	7,21			
		U 236	12,97			
		U 238	0,09			

(Sumber: Betancourt dkk., 2021)

II.2 Model Komputasi Simulasi OpenMC

Perhitungan dilakukan menggunakan kode OpenMC berbasis Monte Carlo, yang menyelesaikan persamaan transport neutron secara stokastik melalui proses penelusuran lintasan (*particle tracking*) (Romano dan Forget, 2012). Tahapan simulasi secara garis besar terlihat pada Gambar 3.



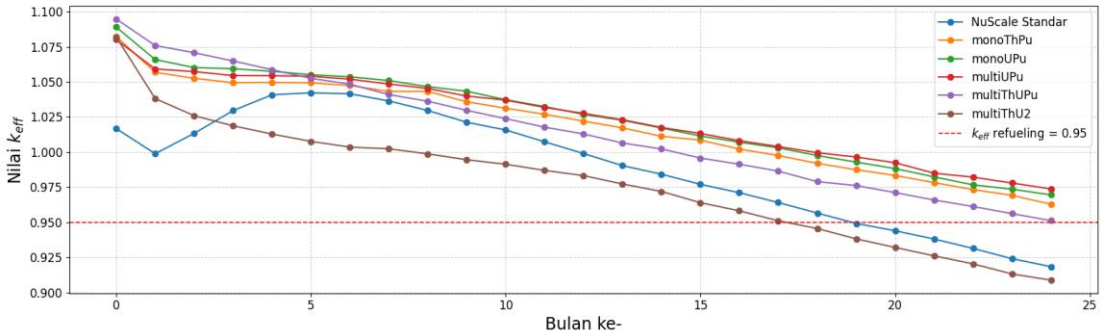
Gambar 3 Diagram alir simulasi OpenMC

III. HASIL DAN DISKUSI

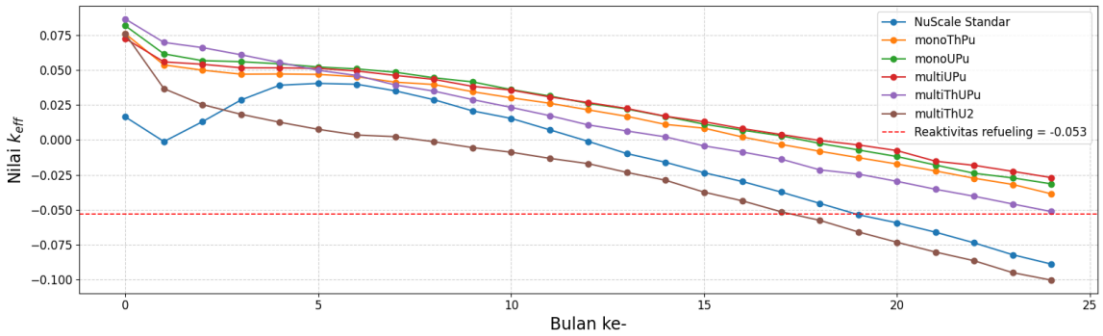
III.1 Evaluasi Kekritisan dan Reaktivitas Reaktor

Analisis kekritisan dan reaktivitas dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan reaktor dalam mempertahankan reaksi fisi berantai yang berkesinambungan selama siklus operasi (Lewis, 2008). Hasil simulasi OpenMC menunjukkan seluruh konfigurasi bahan bakar MOX berada pada kondisi superkritis di awal siklus operasi, dengan nilai $k_{eff} > 1$. Selama proses deplesi, k_{eff} dan reaktivitas menurun secara bertahap karena berkurangnya isotop fisil (Pu-239, Pu-241, dan U-235). Dalam desain reaktor NuScale, batas *refueling* ditentukan pada kondisi $k_{eff} \geq 0{,}95$ (NuScale Power LLC, 2023a). Nilai ini menandai titik di mana reaktor tidak lagi mampu mempertahankan reaksi fisi berantai dan perlu dilakukan pengisian ulang bahan bakar. Dengan demikian, konfigurasi bahan bakar yang dapat menjaga nilai $k_{eff} \geq 0{,}95$ sepanjang periode operasi dianggap layak untuk siklus penuh 24 bulan. Variasi monoThPu, monoUPu, multiUPu, dan multiThUPu tetap mempertahankan kondisi kritis hingga 24 bulan operasi, sedangkan multiThU_2 hanya sampai bulan ke-16 karena dominasi isotop fertil Th-232 yang lambat terkonversi menjadi U-233.

Hubungan antara nilai k_{eff} dan reaktivitas terhadap terhadap waktu operasi untuk berbagai variasi bahan bakar MOX ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik tersebut memperlihatkan tren penurunan kekritisan yang konsisten dengan lamanya siklus iradiasi. Karena reaktivitas secara matematis diturunkan langsung dari k_{eff}, bentuk kurva keduanya identik. Saat k_{eff} mendekati nilai 1, reaktivitas mendekati nol, dan ketika k_{eff} mencapai nilai 0,95 reaktivitas bernilai -0,053, sesuai batas operasional desain NuScale.



(a)



(b)

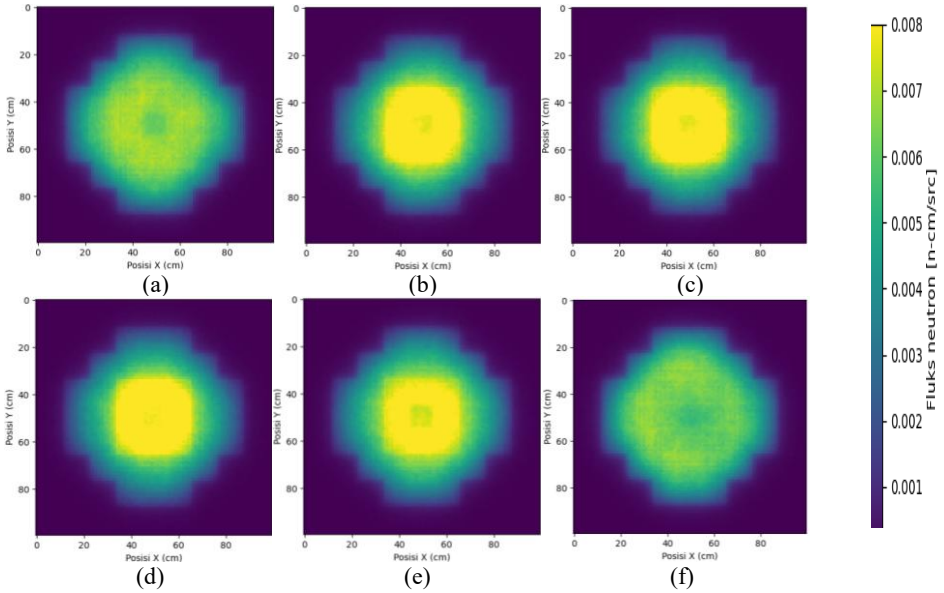
Gambar 4 Nilai (a) k_{eff} (b) Reaktivitas

III.2 Distribusi Fluks Neutron

Distribusi fluks neutron merupakan parameter penting yang mencerminkan penyebaran intensitas reaksi fisi di dalam teras reaktor. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain standar NuScale menghasilkan pola fluks yang relatif seragam di seluruh wilayah teras. Namun, pada konfigurasi dengan bahan bakar MOX, fluks neutron cenderung terkonsentrasi di pusat teras, terutama pada *batch* A-01 yang berisi isotop Pu-239 dan Pu-241 dengan probabilitas fisi tinggi. Peningkatan kontribusi isotop tersebut menyebabkan intensitas fluks di pusat teras lebih besar dibandingkan di tepi, membentuk gradien fluks menurun ke arah luar. Konsentrasi ini diakibatkan oleh keberadaan isotop Pu-239 dan Pu-241 yang memiliki neutron *yield* tinggi, yaitu sebesar 2,8836 $\pm$ 0,0047 dan 2,9479 $\pm$ 0,0055, sehingga

memperbesar jumlah neutron hasil fisi di wilayah tersebut (IAEA, 2008). Sebaran fluks neutron arah radial untuk berbagai variasi bahan bakar MOX ditunjukkan pada Gambar 5.

Secara umum, distribusi fluks neutron selalu menunjukkan nilai maksimum di pusat teras dan menurun secara bertahap ke arah tepi. Fenomena ini merupakan karakteristik alami sistem reaktor karena densitas bahan fisil dan intensitas reaksi fisi tertinggi berada di bagian tengah, sementara di tepi teras sebagian neutron hilang akibat neutron *leakage* menuju reflektor dan moderator. Dari hasil simulasi, variasi monoThPu, monoUPu, multiUPu, dan multiThUPu memperlihatkan puncak fluks yang tinggi di pusat teras dengan gradien penurunan yang jelas ke arah tepi. Sebaliknya, multiThU_2 menampilkan sebaran yang lebih rata.



Gambar 5 Distribusi fluks neutron arah radial (a) Standar NuScale, (b) MonoThPu, (c) MonoUPu, (d) MultiUPu, (e) MultiThUPu, (f) MultiThU_2

III.3 Analisis *Power Peaking Factor*

Power Peaking Factor (PPF) merupakan parameter penting yang digunakan untuk menilai keseragaman distribusi daya di dalam teras reaktor. Dalam perancangan sistem reaktor, batas aman PPF umumnya ditetapkan tidak melebihi 1,3 untuk memastikan bahwa daya lokal maksimum masih berada dalam rentang operasi yang aman secara termal (NRC, 2010). Batas ini digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi performa distribusi daya pada hasil simulasi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi bahan bakar MOX menghasilkan nilai PPF di bawah batas aman tersebut, yang menandakan distribusi daya masih stabil di seluruh wilayah teras. Desain standar NuScale memiliki PPF sekitar 1,160–1,169, sementara variasi bahan bakar MOX menunjukkan peningkatan nilai yang relatif kecil namun masih dalam batas aman. MOX berbasis plutonium seperti monoUPu dan multiUPu menghasilkan nilai PPF tertinggi dengan rentang nilai masing-masing mencapai 1,165-1,180 dan 1,167-1,178, diikuti oleh monoThPu dengan kisaran 1,167–1,177. Sementara itu, multiThUPu memiliki nilai 1,165–1,174 dan multiThU_2 menunjukkan rentang terendah yaitu 1,162–1,172.

Peningkatan nilai PPF pada konfigurasi MOX terjadi akibat distribusi fluks neutron yang lebih terkonsentrasi di pusat teras menyebabkan peningkatan laju fisi lokal dan menghasilkan daya sedikit lebih besar pada daerah pusat. Meskipun demikian, nilai PPF yang diperoleh masih jauh di bawah batas 1,3, sehingga modifikasi bahan bakar MOX tetap aman secara termal dan tidak menimbulkan potensi *power peaking* berlebih.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi analisis yang dilakukan menggunakan program OpenMC dengan pustaka data nuklir ENDF/B-VIII.0, penerapan variasi bahan bakar MOX pada reaktor NuScale terbukti mampu meningkatkan kinerja neutronik tanpa mengurangi batas keselamatan termal. Seluruh variasi MOX menunjukkan kondisi superkritis pada awal siklus dan mengalami penurunan kekritisan secara

bertahap seiring proses iradiasi. Variasi monoThPu, monoUPu, multiUPu, dan multiThUPu mampu mempertahankan nilai faktor multiplikasi efektif di atas batas *refueling* ($k_{eff} \geq 0{,}95$) sehingga memungkinkan operasi penuh hingga 24 bulan, sedangkan multiThU_2 hanya mampu bertahan hingga sekitar 16 bulan karena dominasi isotop fertil Th-232 yang memiliki laju konversi lambat menjadi U-233. Distribusi fluks neutron menunjukkan pola yang alami, yaitu nilai maksimum di pusat teras dan menurun ke arah tepi. Variasi berbasis plutonium memperlihatkan konsentrasi fluks yang lebih tinggi di pusat teras akibat tingginya probabilitas fisi Pu-239 dan Pu-241, sementara variasi berbasis Th menampilkan fluks yang lebih homogen. Nilai PPF seluruh konfigurasi masih berada di bawah batas termal, yaitu PPF <1,3, sehingga tidak terdapat risiko daya lokal berlebih yang dapat mengganggu integritas bahan bakar.

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa MOX berbasis plutonium, khususnya monoUPu dan multiUPu, merupakan pilihan bahan bakar paling optimal. Kedua variasi ini memiliki fraksi isotop fisil tinggi (Pu-239 dan Pu-241) yang dapat menjaga kestabilan reaktivitas, memperpanjang siklus hingga 24 bulan, dan menghasilkan performa neutronik terbaik dibanding variasi lainnya. MOX dengan kombinasi monoThPu dan multiThUPu juga menunjukkan performa baik dan stabil, tetapi stabilitas reaktivitas masih berada di bawah variasi berbasis uranium-plutonium. Sementara itu, multiThU_2 dinilai kurang optimal karena tidak memenuhi syarat perpanjangan siklus. Secara keseluruhan, variasi MOX dengan kandungan isotop fisil Pu tinggi merupakan kombinasi paling efektif untuk memperpanjang siklus operasi reaktor NuScale tanpa mengorbankan keselamatan termal maupun performa neutronik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tidak ada.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Amatullah, A., Permana, S., Irwanto, D., & Aimon, A. H. (2024). Comparative analysis on small modular reactor (SMR) with uranium and thorium fuel cycle. *Nuclear Engineering and Design*, *418*(10), 112934. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112934

Betancourt, M. C., García Hernández, C. R., Dominguez, D. S., Rojas Mazaira, L. Y., Brayner, C. A., Rosales García, J. A., & Iglesias, S. M. (2021). Mixed-oxide fuel strategies in an integral pressurized water reactor. *Progress in Nuclear Energy*, *139*(February). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103844

Gonçalves, D. M. E., da Silva, M. V., da Cunha, C. J. C. M. R., Palma, D. A., & de Stefani, G. L. (2024). Feasibility of Converting NuScale SMRs from UO2 to Mixed (Pu,Th)O2 and (U,Th)O2 Cores: A Parametric Study of the Seed-Blanket Fuel Assembly. *Nuclear Engineering and Design*, *424*(December 2023), 113230. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113230

IAEA. (2023). *Integrated Life Cycle Risk Management for New Nuclear Power Plants*. Retrieved July 8, 2026, from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P2047_web.pdf

IAEA. (2024). *Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments* (Issue October). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15790-PUB9062_web.pdf

IAEA. (2008). *Managing the Socioeconomic and Environmental Consequences of the Nuclear Fuel Cycle*. Retrieved July 8, 2026, from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs464_web.pdf

Lewis, E. E. (2008). *Fundamental of Nuclear Reactor Physics* (1st ed.). Academic Press.

Locatelli, G., Bingham, C., & Mancini, M. (2014). Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progress in Nuclear Energy*, *73*, 75–85. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010

Mignacca, B., & Locatelli, G. (2020). Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *118*(July 2019), 109519. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519

NRC. (2010). *NuScale Technology Overview*. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Retrieved July 8, 2026, from https://www.nrc.gov/docs/ML1034/ML103470495.pdf.

NuScale Power LLC. (2022). *Innovative by Design NuScale Smarter Energy*. NuScale Power LLC. https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smarter-fact-sheet.pdf

NuScale Power LLC. (2023a). *NuScale US460 Plant Standard Design Approval Application: Final Safety Analysis Report, Chapter 4: Reactor*. U.S. Nuclear Regulatory Commission. https://www.nrc.gov/docs/ML2509/ML25099A249.pdf

NuScale Power LLC. (2023b). *Standard Power Chooses NuScale's Approved SMR*. NuScale Power LLC. https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/standard-power-chooses-nuscales-approved-smr-technology-and-entra1-energy-to-energize-data-centers

Romano, P. K., & Forget, B. (2012). The OpenMC Monte Carlo particle transport code. *Annals of Nuclear Energy*. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.06.040

Schlegel, J. P., & Bhowmik, P. K. (2023). Small modular reactors. *Nuclear Power Reactor Designs: From History to Advances*, 283–308. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99880-2.00014-X

World Nuclear Association. (2017). *Mixed Oxide (MOX) Fuel*. https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox

World Nuclear Association. (2025). *Nuclear fuel cycle overview*. World Nuclear Association. https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview