

ANALISIS NEUTRONIK KEKRITISAN TERAS REAKTOR NUSCALE BERBAHAN BAKAR UO_2 DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE OPENMC

Canti Dwi Putri*, Fiber Monado, Menik Ariani

*Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Jl. Raya Palembang-Prabumulih Km.32,
Ogan Ilir, 30862, Indonesia*

^ae-mail: cantidwiputri.13@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis desain reaktor nuscale yang bertujuan untuk menentukan tingkat kekritisannya dengan memodelkan bentuk pin sel, assembly, dan teras, dengan bahan bakar nuklir berupa uranium dioksida yang divariasikan dengan mengubah persentase kandungan uranium-235 sebanyak 1% hingga 7%. Perangkat lunak yang digunakan adalah kode program OpenMC yang berbasis metode monte carlo. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan desain reaktor nuklir serta perhitungan faktor multiplikasi efektif, laju reaksi fisi, dan distribusi fluks neutron selama 2 tahun proses pembakaran (Burn-up). Hasil perhitungan yang di dapat untuk faktor multiplikasi efektif dan laju reaksi menyatakan bahwa semakin besar persentase pengayaan pada uranium-235 maka akan semakin besar pula nilai yang dihasilkan pada kedua parameter. Sedangkan distribusi fluks neutron menghasilkan nilai terbesar terdapat pada wilayah tengah atau pusat bahan bakar serta dilihat dari nilai rata-rata yang dihasilkan, dan nilai terkecil berada pada wilayah tepi sel. Dengan dilakukannya analisis pada reaktor nuscale ini yang nantinya dapat digunakan sebagai acuan dalam penyusunan teras reaktor yang aman dan efisien.

Kata Kunci: Burn-up; Faktor multiplikasi efektif; Laju reaksi fisi; Distribusi fluks neutron; OpenMC.

ABSTRACT

[Title: Neutronic Analysis of the criticality level of the nuscale reactor core with UO_2 fuel using the openMC software] *This study analyzed the design of the NuScale reactor, which aims to determine the level of criticality by modeling the shape of the cell pin, assembly, and core with nuclear fuel in the form of uranium dioxide, which will be varied by changing the percentage of uranium-235 content as much as 0% to 7% by using monte carlo methods in OpenMC program code. This study was conducted to obtain the design of nuclear reactors as well as the calculation of the effective multiplication factor, fission reaction rate, and neutron flux distribution for two years of the combustion process (Burn-up). The result of the calculation for the effective multiplication factor and reaction rate states that the greater the percentage of enrichment in uranium-235, the greater the value of the resulting in both parameters. While the distribution of neutron flux produces the most significant value in the middle region or center of the fuel and is seen from the average value produced, and the smallest value is at the edge of the cell. The analysis of this NuScale reactor can later be used as a reference in preparing a safe and efficient reactor core.*

Keywords: Burn-up; Effective multiplication factor; Fission reaction rate; Neutron flux distribution; OpenMC.

PENDAHULUAN

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia sekarang ini sangat pesat termasuk juga kemajuan dalam bidang teknologi reaktor nuklir. Indonesia adalah salah satu negara yang memiliki potensi sumber daya alam yang sangat melimpah. Kebutuhan manusia akan energi listrik semakin hari semakin meningkat, sedangkan sumber daya alam semakin hari semakin berkurang dan menipis. Oleh karena itu dibutuhkan sumber daya baru yang mampu memenuhi kebutuhan manusia akan energi listrik. Salah satu sumber daya baru yang bisa dimanfaatkan adalah energi nuklir. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah salah satu

pembangkit listrik yang mampu menghasilkan listrik dengan daya yang besar dan ekonomis (Herawati dan Sudagung., 2020).

Reaktor nuklir mampu menghasilkan energi nuklir yang memiliki keuntungan nyata, yaitu pencemaran lingkungan yang terjadi lebih sedikit dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga konvensional, dan memiliki tingkat keamanan yang baik, serta lebih ekonomis (Suhariyono, 2006). Reaktor nuklir bekerja dengan cara yang sama seperti pembangkit listrik konvensional, tetapi juga memiliki sedikit perbedaan. Perbedaan ini terdapat pada sumber energi dan bahan bakar yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Sumber energi

pembangkit listrik konvensional pada umumnya melalui proses pembakaran bahan bakar mineral secara kimia, sedangkan energi pada reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi dan bahan bakar yang digunakan berupa bahan bakar fisil (Novalianda dkk., 2016).

Reaksi fisi banyak ditemui pada reaktor nuklir, salah satu reaktor nuklirnya adalah *Pressurised water reactor* (PWR) dan *Small modular reaktor* (SMR). *Pressurised water reactor* adalah jenis reaktor nuklir yang menggunakan pendingin berupa air dengan dua sistem pendingin (Effendi dkk., 2018). *Small modular reaktor* salah satu teknologi reaktor nuklir yang berkembang dan memiliki ukuran yang lebih kecil dan tingkat keamanan yang baik (Darmawan., 2021).

PLTN dengan jenis *pressuried water reactor* salah satunya adalah reaktor nuscale yang termasuk kedalam generasi 3+. Reaktor nuscale dioperasikan oleh departemen energi Amerika Serikat. Reaktor nuscale adalah reaktor integral yang didesain oleh *Nuscale Power Inc.* Bahan bakar yang digunakan pada reaktor nuscale berupa UO_2 dengan pengkayaan <4,95% serta dengan sistem pendingin menggunakan sirkulasi alamiah, sehingga tidak memerlukan pompa (Suwoto dkk., 2020). *PWR* atau reaktor air bertekanan dibuat oleh *westinghouse bettis atomic power laboratory* yang tujuan awalnya untuk keperluan militer Amerika Serikat. Reaktor air bertekanan ini salah satu reaktor daya yang sering digunakan di dunia dengan angka hampir sekitar 63% (Subkhi dkk., 2015). Reaktor air bertekanan telah masuk kedalam data base PRIS. Selama 50 tahun mengumpulkan data kinerja tenaga nuklir dan spesifikasi reaktor, PRIS telah menjadi database internasional terkemuka tentang reaktortenaga nuklir. PRIS adalah sumber data tenaga nuklir yang unik dengan informasi lengkap tentang reaktor tenaga nuklir. Datanya disediakan langsung dari petugas penghubung nasional yang ditunjuk secara resmi dan penyedia data di lokasi reaktor tenaga nuklir di Negara Anggota IAEA. Itu menjadikan PRIS satu-satunya database tenaga nuklir yang komprehensif dan berwibawa di dunia (IAEA., 2020)

Reaksi Fisi adalah reaksi yang terjadi akibat proses pembelahan inti atom yang berat bertabrakan dengan atom lainnya atau neutron sehingga menghasilkan energi, inti atom yang lebih ringan, neutron tambahan, dan menghasilkan proton dalam bentuk sinar gamma (Setiyo dan Munir, 2010). Teras reaktor nuklir adalah tempat terjadinya proses pembakaran bahan bakar nuklir pada reaktor yang

Metode monte carlo adalah salah satu metode perhitungan dengan tujuan mengatasi permasalahan yang sulit, dengan cara melakukan simulasi di setiap

berasal dari ratusan *assembly*. *Assembly* terdiri dari banyak sel bahan bakar (*fuel cell*) yang merupakan bagian yang terkecil di dalam teras reaktor (Novalianda., 2019).

Bahan bakar nuklir terbagi menjadi dua macam antara lain, bahan bakar fisil dan bahan bakar fertil. Bahan bakar dengan jenis fisil merupakan atom atau partikel unsur yang dapat membelah dengan mudah sehingga mampu dalam mengambil neutron, sedangkan bahan bakar fertil adalah atom atau partikel unsur yang tidak mampu membelah akan tetapi dapat digunakan sebagai bahan bakar fisil dengan proses reaksi penangkapan neutron (Novalinda., 2019).

Burn-up atau fraksi bakar dapat didefinisikan sebagai hasil pembakaran yang diperoleh dari jumlah energi yang dilepaskan per unit massa pada bahan bakar. Selama proses *burn-up* nilai densitas pada atom akan berubah sesuai dengan lamanya waktu *burn-up* (Novalianda, 2019). Perhitungan *burn-up* dapat digunakan untuk menganalisis penyusutan dan produksi isotop sebagai fungsi dari waktu. Analisis terjadinya penyusutan pada bahan bakar di dalam reaktor melibatkan setidaknya 15-24 buah nuklida serta 25-50 hasil reaksi fisi (*fission product*) (Dian dan Handayani., 2010).

Faktor Multiplikasi adalah parameter yang digunakan untuk menunjukkan tingkat populasi dari neutron di dalam teras reaktor nuklir. Neutron yang diberikan dalam reaksi fisi akan menyebar di sekitar reaktor, dan akan menghasilkan generasi baru neutron fisi (Duderstand dan Hamilton., 1976). Faktor mutliplikasi terbagi menjadi dua yaitu, yang pertama faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) adalah perubahan jumlah neutron dalam teras reaktor yang dianggap tak berhingga dan tidak memperhitungkan kebocoran pada teras reaktor. Dan yang kedua faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) adalah perubahan jumlah neutron di dalam teras reaktor dan memperhitungkan kebocoran neutron di dalam teras reaktor secara berhingga (Ricahrdina dkk., 2015).

Nuscale merupakan reaktor yang terdiri dari 12 modul yang independen, masing-masing mampu menghasilkan daya listrik sebesar 45 MWe. Setiap modul pada reaktor nuscale beroperasi pada kondisi aliran primer sirkulasi alami. Dalam desain reaktor nuscale terdapat beberapa komponen, yaitu bejana tekan reaktor yang terintegrasi yang didalamnya berisikan teras reaktor, generator uap yang berbentuk silinder, dan terdapat pressurizer (Medina dan Francois, 2021).

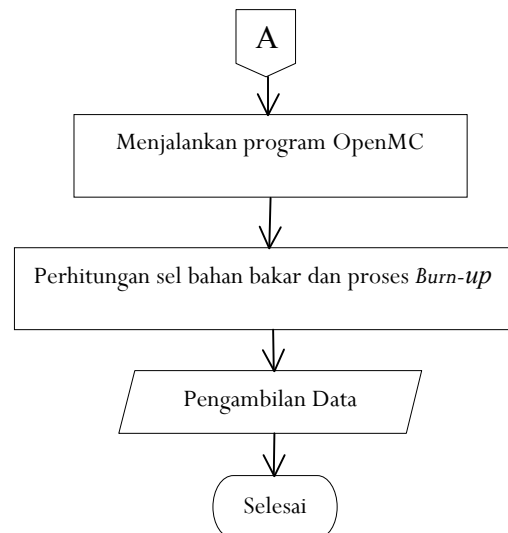
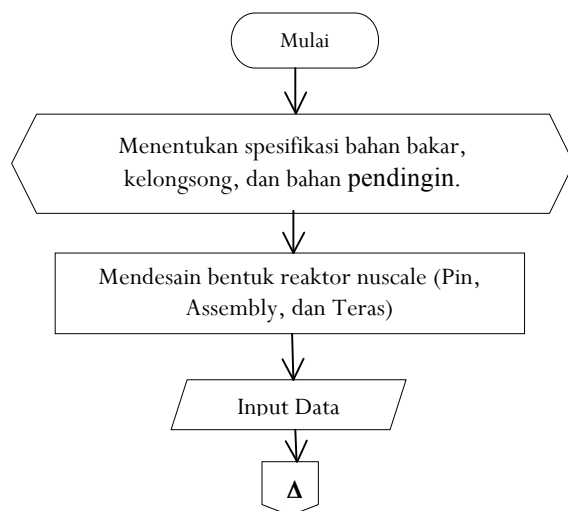
pristiwa probabilistik tunggal yang timbul secara berurutan. Metode ini memerlukan waktu perulangan yang banyak untuk keseluruhan peristiwa

yang akan disimulasikan dapat digambarkan dengan baik dan utuh, sehingga metode ini memerlukan waktu proses komputasi lebih lama (Shafi,2013).OpenMC adalah kode transportasi partikel monte carlo yang relatif lebih mudah, kode ini telah dikembangkan pada tahun 2011 dan pertama kali dirilis kepublik pada bulan desember 2012. OpenMC menggunakan teknik yang dikenal dengan model geometri padat konstruktif (CSG) untuk membangun dalam bentuk-bentuk tiga dimensi yang kompleks (Romano dkk.,2015).

Pada penelitian ini melakukan analisis neutronik pada teras reaktor nuscale untuk mengetahui tingkat kekritisan dari bahan bakar nuklir yang digunakan. Dalam melakukan analisis teras reaktor nuklir diperlukan simulasi, salah satu simulasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi monte carlo berbasis perangkat lunak openMC.

METODE

Penelitian ini bertempatdi LaboratoriumElektronika Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya. Alat dan bahan yang digunakan terbagi menjadi dua yaitu, yang pertama perangkat keras (*hardware*)berupa *personal computer* (PC) berbasis sistem operasi linux Ubuntu 20.04 LTS yang berfungsi sebagai media dalam menjalankan perangkat lunak. Dan yang kedua perangkat lunak (*software*) yang terdiri dari paket program openMC dengan pustaka ENDF/B.VII.1 yang berfungsi untuk melakukan simulasi analisis neutronik tingkat kekritisan reaktor nuscale, dan jupyter notebook dengan bahasa pemrograman python3 yang berfungsi menghasilkan file XML sebagai masukan dari openMC. Penelitian ini digambarkan pada diagram alir berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Pemrograman

Perhitungan Teras reaktor nuscale akan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) OpenMC. Dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 1.Spesifikasi Bahan Bakar Reaktor Nuscale (Medina dan Francois, 2021).

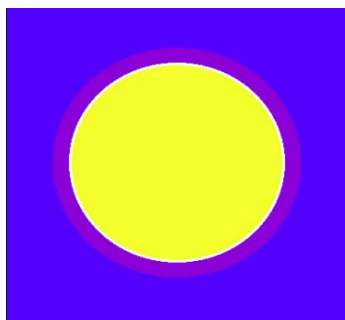
Parameter	Deskripsi
Geometri Bahan Bakar	Pin
Bahan Bakar	Uranium Dioksida(UO ₂)
Daya Termal	160 MWth
Daya Listrik	Pembangkit 45 MWe
Efisiensi Listrik	Pembangkit >30.0%
Kelongsong	Zirconium Alloy-4 (Zircolay-4)
Elemen Bahan Bakar	17 x 17
Ketinggian inti	2.0 m
Diameter Luar	2.83 m
Tinggi Vesell	20.0 m
Geometri Kisi	Square Array
Pengayaan	<4.95%
Pengisian Bahan Bakar	24 Bulan

Penelitian ini mencari parameter survei yang terbagi menjadi tiga jenis yaitu, pertama Faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) merupakan konstanta yang menunjukkan jumlah neutron yang berada di dalam suatu generasi terhadap jumlah neutron yang hilang pada generasi selanjutnya. Kedua Laju reaksi merupakan jumlah reaksi fisi yang terjadi di dalam teras reaktor per detik. Dan yang terakhir Distribusi fluks neutron merupakan jumlah neutron yang melalui luasan pada satu meter persegi per detik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain Model Pin cell

Desain reaktor nuscale model pincell dengan menggunakan software OpenMC.

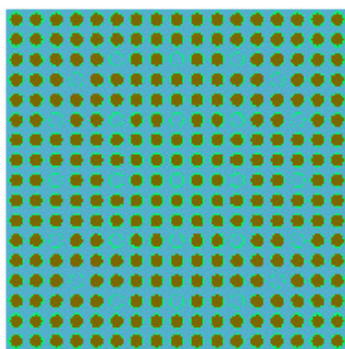


Gambar 2. Desain Model Pincell

Dari gambar2 dapat dilihat bahwa bentuk pin cell memiliki komposisi material bahan bakar (*fuel*) berupa uranium dioksida (UO_2) yang ditandai warna kuning, kemudiandibungkus dengan kelongsong berupa zirkonium alloy-4 (Zircolay-4) yang ditandai warna ungu, dan komposisi terakhir yang mengelilingi bahan bakar dan kelongsong berupa air ringan sebagai bahan pendingin.

Desain Model Assembly

Desain model assembly dari reaktor nuscale dengan menggunakan software OpenMC.



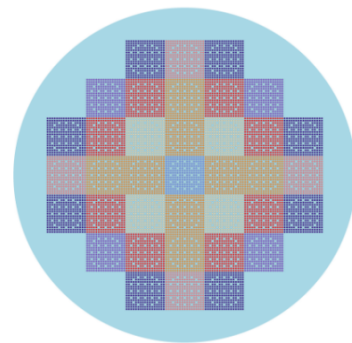
Gambar 3. Desain Assembly Nuscale

Penelitian ini mencari parameter survei yang terbagi menjadi tiga jenis yaitu, pertama Faktor multiplikasi

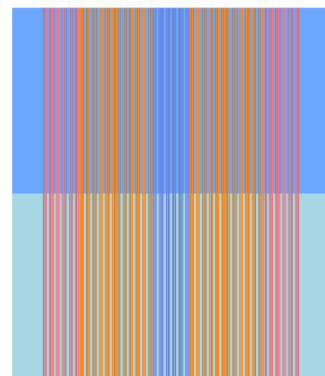
efektif (k_{eff}) merupakan konstanta yang menunjukkan jumlah neutron yang berada di dalam suatu generasi terhadap jumlah neutron yang hilang pada generasi selanjutnya. Kedua Laju reaksi merupakan jumlah reaksi fisi yang terjadi di dalam teras reaktor per detik. Dan yang terakhir Distribusi fluks neutron merupakan jumlah neutron yang melalui luasan pada satu meter persegi per detik.

Desain Model Teras

Desain model teras (*core*) reaktor nuscale dengan menggunakan software OpenMC



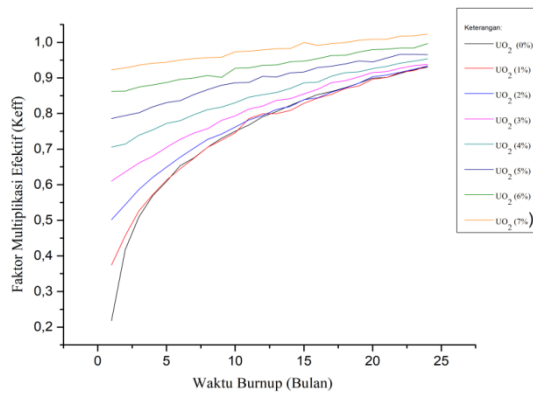
Gambar 4 Desain Teras Tampak Atas



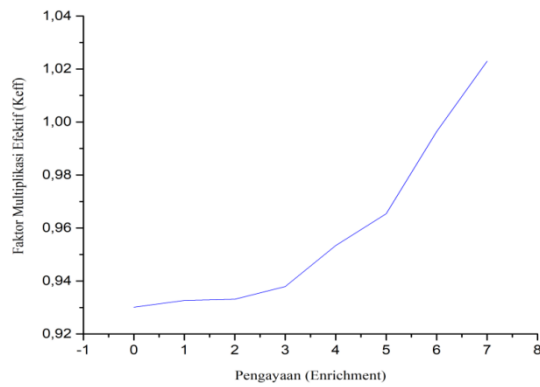
Gambar 5 Desain Teras Tampak Samping

Dari gambar 4 dan 5 menunjukkan desain dari sisi atas dan samping yang berbentuk lingkaran dan persegi dengan warna merah dan orange yang merata menunjukkan bahan bakar murni (UO_2), warna ungu, merah muda, dan biru tua menunjukkan bahan bakar yang dicampur dengan gadolinium (Gd_2O_3). Warna abu-abu tipis menunjukkan kelongsong berupa Zirkonium Alloy-4 (Zircolay-4), warna putih yang tipis menunjukkan gap berupa helium, dan yang terakhir warna biru muda menunjukkan bahan pendingin berupa air ringan.

Faktor Multiplikasi Efektif (Keff)



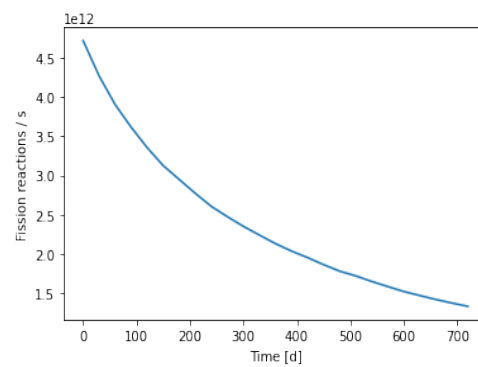
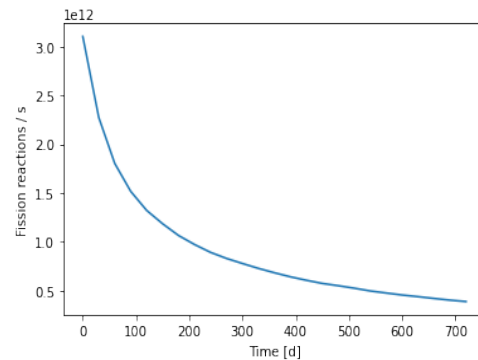
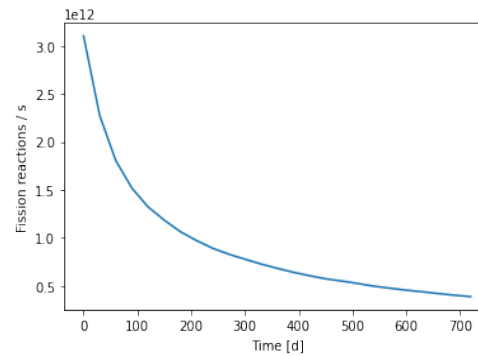
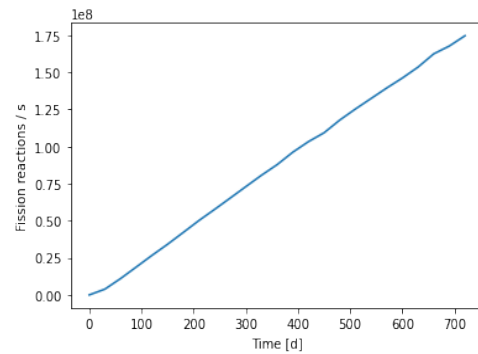
Gambar 6 Faktor Multiplikasi Efektif Variasi Pengayaan 0% Hingga 7%

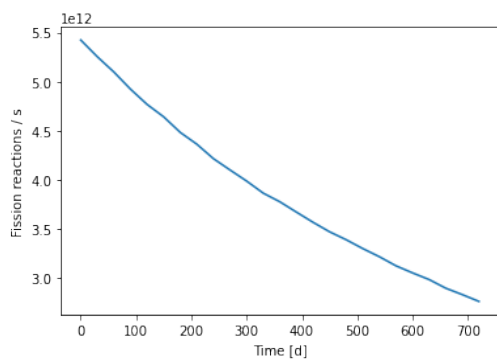
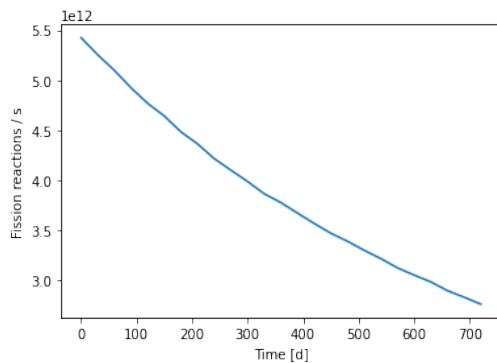
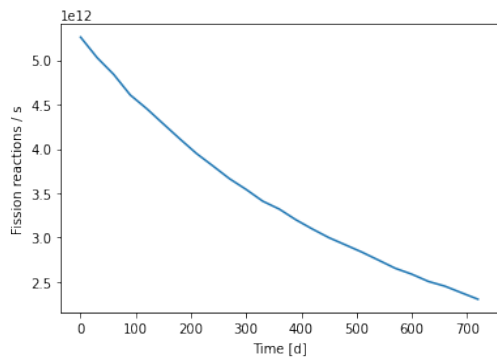
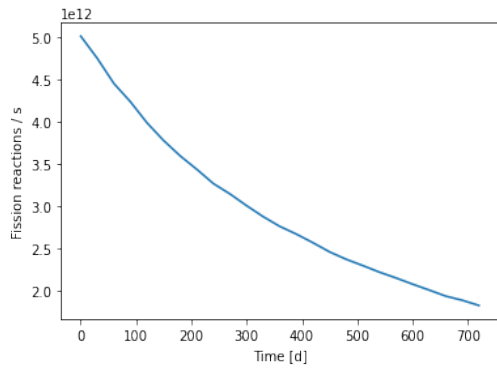


Gambar 7 Nilai Faktor Multiplikasi Efektif Bulan ke-24 Variasi Pengayaan 0% Hingga 7%

Dari Gambar 6 dan 7 dapat diketahui bahwa nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) reaktor nuscale dengan bahan bakar berupa uranium dioksida (UO_2) berbanding lurus dengan lamanya waktu pembakaran bahan bakar (*burn-up*). Ketika proses *burn-up* sebagian dari uranium-238 yang terdapat didalam komposisi uranium dioksida (UO_2) sebagai bahan bakar utama yang bersifat fertil berubah menjadi unsur lain yang bersifat fisil.

Laju Reaksi





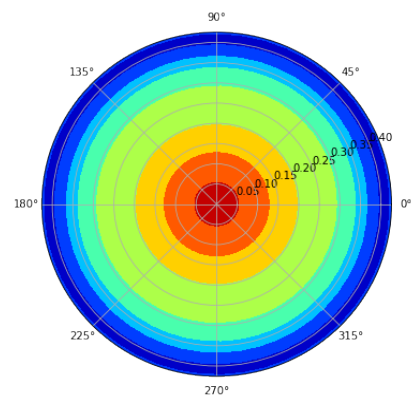
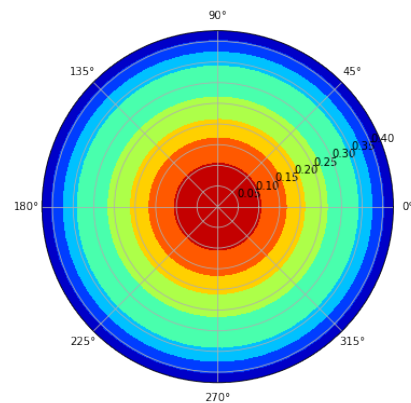
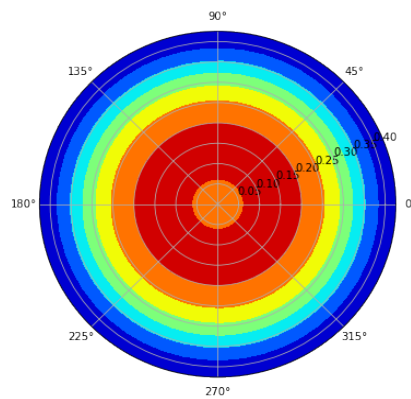
Gambar 8 Laju Reaksi dengan variasi pengayaan 0% hingga 7%

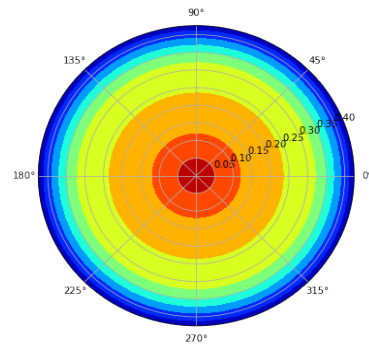
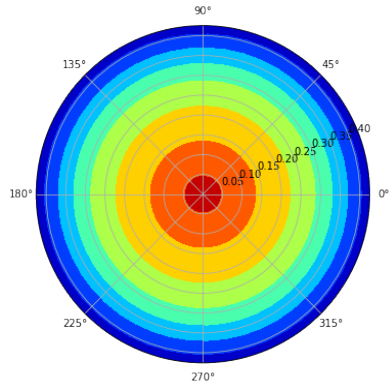
Dari Gambar 8 laju reaksi mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu selama masa operasi pembakaran. Penurunan ini disebabkan bahan bakar yang digunakan mengalami penyusutan sehingga reaksi fisi yang terjadi

berkurang dan populasi neutron semakin lama akan semakin berkurang pula.

Grafik laju reaksi tanpa pengayaan berbanding lurus dengan kenaikan pengayaan pada bahan bakar. Hal ini disebabkan hanya terdapat bahan bakar fisil uranium-235 tanpa penambahan bahan fisil lainnya dan terdapat uranium-238 yang termasuk bahan bakar fertil yang ketika ditumbuk oleh neutron akan mengalami reaksi penangkapan neutron.

Distribusi Fluks Neutron

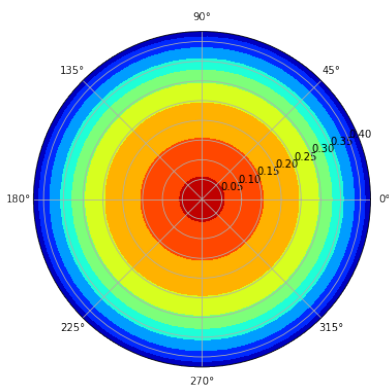
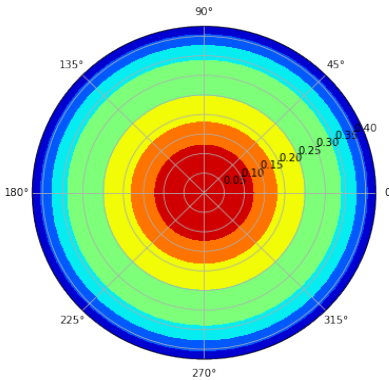
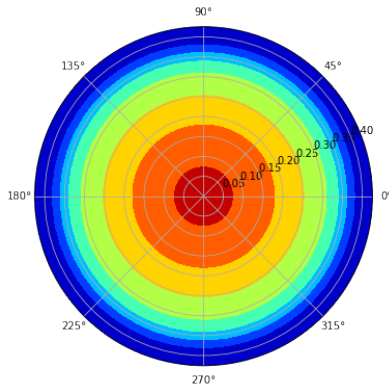




Gambar 9 Distribusi Fluks Variasi Pengayaan 0% Hingga 7%

Tabel 2 Nilai Rata-rata Distribusi Fluks Variasi Pengayaan 0% Hingga 7%

Pengayaan (%)	Nilai Rata-rata Distribusi Fluks (n/cm^2s)
0	0,039965
1	0,038589
2	0,038369
3	0,037615
4	0,038321
5	0,040213
6	0,040129
7	0,035385



Distribusi fluks yang dihasilkan dari variasi pengayaan berbentuk lingkaran dengan banyak spektrum warna yang dihasilkan. Warna-warna tersebut menunjukkan sebaran neutron. Warna merah menunjukkan banyaknya sebaran neutron yang terjadi dalam wilayah pusat. Warna orange menunjukkan sebaran neutron yang bergerak kearah luar dan menjauhi pusat. Serta yang terakhir warna biru menunjukkan sebaran neutron yang terjadi semakin sedikit. Hal ini disebabkan karena adanya kebocoran neutron yang keluar dari sistem dan serapan material diluar bahan bakar. Selain itu distribusi fluks neutron yang baik dapat dilihat dari nilai rata-rata yang dihasilkan. Jika nilai rata-rata yang dihasilkan bernilai besar maka distribusi fluks tersebut dalam keadaan optimal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada penelitian ini menghasilkan nilai faktor multiplikasi efektif sel bahan bakar selama 24 bulan mencapai keadaan kritis terjadi pada pengayaan 7%, serta Laju reaksi variasi pengayaan 0% hingga 7% dipengaruhi oleh banyaknya jumlah bahan bakar uranium-235 yang bersifat fisil, dan menghasilkan Distribusi fluks yang optimal terjadi saat uranium-235 dengan pengayaan 5% sebesar $0,040213 \text{ (n/cm}^2\text{s)}$.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian/publikasi artikel ini dibiayai oleh Anggaran DIVA Badan Layanan Umum Universitas Sriwijaya Tahun Anggaran 2021. SP DIVA-023.17.2.677515/2022, tanggal 13 Desember 2021, sesuai dengan SK Rektor 0109/UN9.3.1/SK/2022, tanggal 18 April 2022.

DAFTAR PUSTAKA

- Darmawan.,2021. *Perbandingan Tipe Tekanan Emergency Core Cooling System Pada Small Modular Reactor*. Jurnal Material dan Energi Indonesia, 1 (11):8.
- Dian,F., dan Handayani,T.,2010. *Perancangan Kode Simulasi Untuk Analisis BurnUp 3 Dimensi Satu Siklus Pada Reaktor Pembangkit Cepat*. Jurnal Ilmu Fisika, 1 (2): 2-3.
- Duderstadt,J.J., dan Hamilton,L.J., 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. New York: Jhon Wiley and Sons Incorporate.
- Effendi,D. Yulianti,Y., dan Syafriadi.,2018. *Analisis Termal Hidrolik Reaktor Air Bertekanan (pressurized water reactor) Menggunakan Metode Lu Faktorisasi*. Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika., 2(6): 201.
- Herawati,N., dan Sudagung, A.D., 2020. *Persepsi Masyarakat dan Potensi Acceptance Terkait Wacana Pembangunan PLTN di Kabupaten Bengkulu*. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, 22 (2): 111.
- IAEA (International Atomic Energy Agency)., 2020. *Power Reactor Information System: Past, Present and Future*. Austria: IAEA Publishing.
- Medina, S. P., dan Francois, J.L., 2021. *Neutronic Analyssis of The Nuscale Core Using Accident Tolerant Fuels With Different Coating Materials*. Nuclear Engineering and Design, 377: 2.
- Novalianda,S., Ariani,M., Monado,F., dan Su'ud, Z., 2016. *Studi Awal Perhitungan Sel Bahan Bakar Berbasis Uranium Oksida (UO2) Pada Reaktor Cepat Berpendingin Helium*. Jurnal Lingkungan dan Pembangunan, 2 (1): 382.
- Novalinda,S., 2019. *Power Fletting Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Plutonium Nitride (U,Pu)N*. Jurnal of electrical techonology, 3 (4) :140.
- Ricardina, V., Budi, W.S., dan Tjiptono, T.W., 2015. *Studi Parameter Reaktor Berbahan Bakar UO2 dengan Moderator H2O dan Pendingin H2O*. Berkala Fisika, 18 (3): 96
- Romano, P. K., Horelik, N.E., Herman, B.R., Nelson, A.G., Forget, B., dan Smith,K., 2015. *A State of The Art Monte Carlo Code For Research and Developpment*. Annals Of Nuclear Energy,82: 90.
- Shafii, M.A., 2013. *Beberapa Metode Penyelesaian Persamaan Transport Neutron Dalam Reaktor Nuklir*. Jurnal Ilmu Dasar, 2 (14): 59 dan 62.
- Setiyo, A., dan Munir,M., 2010. *Analisis distribusi suhu aksial teras dan penentuan (k_{eff}) PLTN pebble bed modular reactor (PMBR) 10 MWE menggunakan metode MCPN 5*. Jurnal Berkala Fisika, 12 (3) : 86.
- Subkhi, M. A., Suued,Z., Waris,A., dan Permana,S., 2015. *Studi Desain Reaktor Air Bertekanan (PWR)*. Jurnal ISTEK, 9 (1) :37-38.
- Suhariyono,G., 2006. *Perkembangan Tenaga Nuklir Di Dunia*. Bulletin Alara, 7 (3): 106.
- Suwoto dkk., 2020. *Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Doppler Bahan Bakar Reaktor Nuscale*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir.189-190.