



Analisis neutronik reaktor cepat berpendingin Helium dengan daya 900 MWth berbasis bahan bakar Thorium Mixed Oxyde

DIAN MARINI, MENIK ARIANI*, SUPARDI, DAN AKMAL JOHAN

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan 30862, Indonesia

<p>Kata kunci: reaktor nuklir, thorium, plutonium</p>	<p>ABSTRAK: Thorium berpotensi untuk menjadi alternatif bahan bakar reaktor nuklir. Namun, dibutuhkan penambahan bahan bakar fisil lain seperti plutonium-239 karena thorium alam tidak memiliki isotop fisil. Penelitian ini menyajikan analisis hasil perhitungan sel bahan bakar thorium dengan atau tanpa penambahan plutonium-239, Digunakan fraksi volume 60% fuel, 10% cladding dan 30% helium sebagai pendingin dan menggunakan skema <i>burnup Modified CANDLE</i> aksial. Hasil yang didapatkan yaitu berupa faktor multipikasi efektif (k_{eff}) dan distribusi daya dengan waktu burnup 10 tahun. Pengaruh dari penambahan plutonium-239 terhadap tingkat kekritisasi reaktor dapat ditunjukkan oleh hasil perhitungan yang dilakukan pada penelitian ini yang ditunjukkan oleh nilai $k_{eff} = 1,1$ ditahun pertama <i>burnup</i> dan nilai $k_{eff} = 1.001$ di tahun ke-10.</p>
<p>Keywords: nuclear reactor, thorium, plutonium</p>	<p>ABSTRACT: Thorium has the potential to be an alternative fuel for nuclear reactors. However, it is necessary to add other fissile fuels such as plutonium-239 because natural thorium has no fissile isotopes. This study presents an analysis of the results of the calculation of thorium fuel cells with or without the addition of plutonium-239. The volume fraction of 60% fuel, 10% cladding and 30% helium is used as a coolant and uses the Modified CANDLE axial burnup scheme. The results obtained are in the form of an effective multiplication factor (k_{eff}) and power distribution with a burnup time of 10 years. The effect of the addition of plutonium-239 on the criticality level of the reactor can be shown by the results of the calculations carried out in this study which are shown by the value of $k_{eff} = 1,1$ in the first year of burnup and the value of $k_{eff} = 1.001$ in the 10th year.</p>

1 PENDAHULUAN

Dalam kehidupan sehari-hari masyarakat sangat membutuhkan energi untuk melaksanakan aktifitas. Energi sebagai sumberdaya alam harus dimanfaatkan sebesar-besarnya bagi kemakmuran masyarakat [1]. Mayoritas kebutuhan energi dunia disuplai dari energi fosil, khususnya pada negara-negara berkembang seperti di negara Indonesia. Pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil seperti batubara, minyak bumi, dan gas mempunyai potensi menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan.

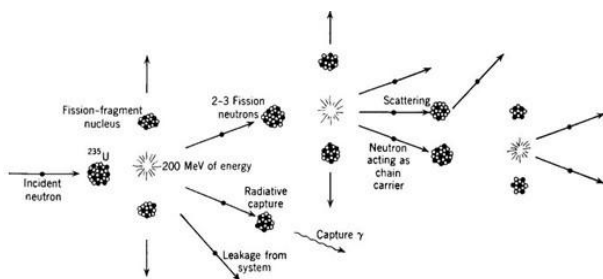
Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM). Dibandingkan dengan jenis energi lainnya, permintaan energi listrik tumbuh lebih cepat. Kondisi kelistrikan nasional hingga bulan Juni 2020 mencapai 71 Giga Watt (GW). Dibandingkan dengan akhir tahun 2019 lalu angka ini naik 1,3 GW, yaitu sebesar 69,7 GW [2]. Sumber daya

yang menghasilkan energi listrik semakin terbatas, sehingga membutuhkan energi alternatif lain. Salah satu sumber energi alternatif lain yaitu energi yang dihasilkan dari reaksi fisi pada reaktor nuklir. Energi nuklir dapat menghasilkan daya listrik yang besar. PLTN diharapkan mampu menggantikan sumber daya energi yang pasokannya akan habis [3].

Reaksi fisi dalam reaktor nuklir berlangsung secara terkendali dan kontinu untuk menghasilkan energi nuklir, radioisotop, dan nuklida baru. Hal ini dilakukan untuk membatasi jumlah neutron sehingga pembelahan inti berikutnya hanya menyerap satu neutron. Keseimbangan jumlah neutron adalah keadaan yang diinginkan pada reaktor nuklir, sehingga jumlah neutron yang membentuk reaksi fisi adalah tetap. Neutron dalam reaktor nuklir digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi inti. Reaksi fisi ini nantinya akan menghasilkan inti ringan, neutron dan energi sebesar 200 MeV .

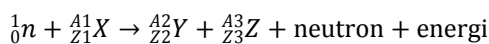
* Corresponding Author: email: menik_ariani@unsri.ac.id No. HP: +6289627070771

Pada saat pemecahan inti menjadi atom lain yang lebih ringan, energi pengikat atom semula dibebaskan. Energi yang dibebaskan itu terbentuk dari energi kinetik dari dua atau tiga neutron cepat yang mengalami hamburan, radiasi beberapa jenis sinar dan panas. Hasil reaksi fisi dua dari tiga neutron kemudian menumbuk inti uranium-235 lainnya dan menimbulkan reaksi fisi berikutnya (reaksi fisi generasi kedua). Neutron hasil fisi dari reaksi fisi kedua ini diharapkan akan menimbulkan reaksi fisi berikutnya (reaksi fisi generasi ketiga), dan selanjutnya akan terjadi reaksi fisi dari generasi ke generasi secara kontinu. Reaksi fisi inilah yang disebut sebagai reaksi fisi berantai. Proses reaksi fisi berantai dari unsur Uranium-235 ditunjukkan pada Gambar 1 [4].

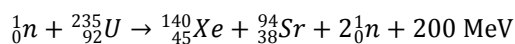


Gambar 1. Skema reaksi fisi berantai pada U-235 [4].

Mekanisme pengendali seperti batang kendali (terbuat dari bahan penyerap neutron) diperlukan untuk mengontrol pelepasan energi dan reaksi berantai. Mekanisme inilah yang mempertahankan kestabilan reaksi berantai dan daya keluaran. Persamaan umum reaksi fisi yaitu:

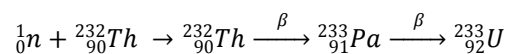


Contoh dari reaksi fisi yang terjadi pada Uranium-235,



Kondisi awal neutron pada Gambar 1 menumbuk bahan uranium-235. Pembelahan inti dapat berlangsung berkelanjutan andaikan dapat diatur supaya satu neutron yang lepas dari reaksi pembelahan inti dapat selalu ditangkap oleh inti uranium-235 yang lain. Inti-inti ini akan terurai dan melepaskan lebih banyak neutron. Oleh karena itu terjadilah reaksi berantai. Reaksi fisi berantai terkendali dapat diusahakan berlangsung di dalam reaktor nuklir yang menjamin keamanannya dan energi yang dihasilkan selain dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik, juga dapat digunakan untuk keperluan lain, misalnya untuk penelitian. Di dalam reaksi fisi yang terkendali, jumlah neutron dibatasi sehingga hanya satu neutron saja yang akan diserap untuk pembelahan inti berikutnya [5].

Bahan bakar utama reaktor nuklir yang sering digunakan adalah uranium. Pemanfaatan uranium ini, yang juga disebut dengan siklus uranium (*uranium cycle*) pada prinsipnya menggunakan U^{235} dan Pu^{239} (ditransmutasikan dari U^{238}) sebagai bahan fisil dan U^{238} sebagai bahan fertil. Bahan bakar alternatif yang bisa digunakan adalah thorium. Thorium-232 bersifat fertil (tidak fisil) sehingga tidak langsung dapat digunakan dalam reaktor. Namun setelah menyerap neutron akan berubah menjadi uranium-233 yang merupakan bahan bakar fisil yang sangat baik. Dalam hal ini mirip dengan uranium-238 (yang berubah menjadi plutonium-239)[6,7,8,9]. Reaksi penangkapan neutron yang terjadi adalah sebagai berikut:



Meskipun dapat menghasilkan bahan fisil Uranium-233 namun thorium membutuhkan bahan fisil sebagai penggerak sehingga reaksi berantai dapat dipertahankan. Salah satu opsi penggerak fisil yaitu Plutonium-239 [8,9].

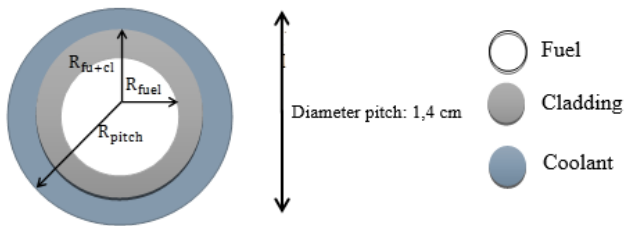
Telah dilakukan studi mengenai perancangan reaktor nuklir dengan bahan bakar thorium-232 yang memiliki potensi sebagai bahan bakar sebuah reaktor nuklir. Bahan bakar campuran thorium-232 yang bersifat fertil dan bahan fisil plutonium-239 digunakan agar reaktor memiliki kinerja yang baik, ditandai dengan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) ≥ 1 selama waktu burnup 10 tahun. Reaktor dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar ulang [8]. Desain reaktor pada penelitian ini memanfaatkan nuklida plutonium-239 sebagai bahan fisil yang digabungkan dengan thorium-232. Variasi nilai persentase plutonium-239 dalam bahan bakar thorium mixed oxyde pada penelitian ini dilakukan dengan tujuan memperoleh komposisi paling tepat untuk suplai teras reaktor berpendingin helium berukuran 900 MWth.

2 METODE PENELITIAN

Dalam mendesain reaktor diperlukan spesifikasi ukuran sel bahan bakar dan teras reaktor, parameter desain GFR ditunjukkan pada Tabel 1. Analisis neutronik pada reaktor memerlukan sejumlah perhitungan untuk sel bahan bakar dan teras reaktor. Geometri sel bahan bakar dalam penelitian ini berbentuk silinder (*cylindrical cell*) yang terdiri dari sel bahan bakar (*fuel*) yang dilapisi dengan kelongsong (*cladding*) dan pendingin (*coolant*). Penampang lintangnya ditunjukkan pada Gambar 2.

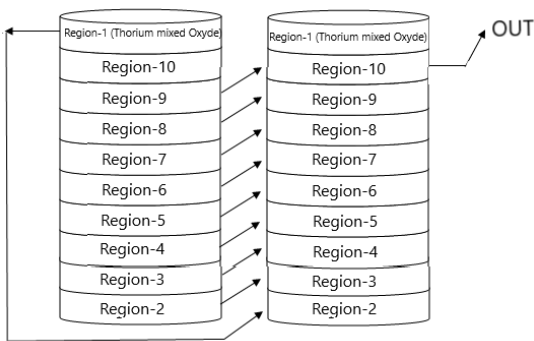
Tabel 1. Spesifikasi parameter desain teras reaktor

Parameter	Deskripsi
Daya termal (MWt)	900 MWt
Bahan Bakar	Thorium mixed
Siklus refueling	oxyde(Th, Pu)O ₂
Geometri teras	10 tahun
Material cladding	Silinder
Coolant	Stainless steel 316 (SS316)
Fraksi volume: (Fuel ; cladding ; coolant)	Helium
Ukuran teras aktif	60% ; 10% ; 30%
	200 cm x 300 cm



Gambar 2. Geometri Sel Bahan Bakar.

Komposisi wilayah sel bahan bakar pada penelitian ini yaitu 60% bagian untuk *fuel pellet*, 10% untuk kelongsong (*cladding*) dan 30% untuk helium sebagai pendingin (*coolant*). Strategi *burnup* yang digunakan adalah MCANDLE (*Modified Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy producing reactor*). Wilayah 1 diisi oleh bahan bakar dan setelah 10 tahun terbakar, kemudian dialihkan ke wilayah 2. Mekanisme ini diterapkan ke semua wilayah. Skemanya ditunjukkan pada Gambar 3[8].

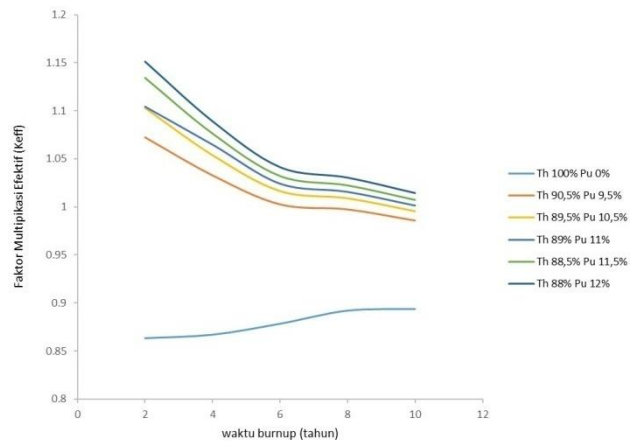


Gambar 3. Skema Modified CANDLE aksial

Parameter survei dalam menentukan analisa dan hasil meliputi faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dan distribusi daya teras reaktor dalam arah radial dan aksial.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini perhitungan neutronik setiap komponen sel bahan bakar penyusun teras reaktor menggunakan program SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*)[10]. Komposisi bahan bakar yang digunakan adalah thorium alam dan penambahan beberapa persen plutonium-239 sebagai pemicu yang menyebabkan terjadinya reaksi fisi pada reaktor nuklir. Perhitungan ini menghasilkan beberapa parameter survei neutronik yaitu faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) selama waktu operasi 10 tahun dan distribusi daya teras reaktor dalam arah radial dan aksial.

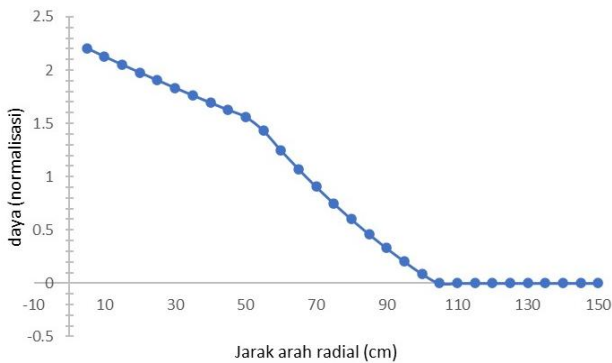


Gambar 4. Perubahan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) selama waktu operasi 10 tahun.

Gambar 4 menunjukkan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) selama waktu operasi 10 tahun. Penggunaan bahan bakar thorium alam (Th-232 100%) tanpa pengayaan belum menghasilkan reaktor yang kritis karena nilai faktor multiplikasi efektif k_{eff} masih kurang dari 1 ($k_{eff} < 1$). Agar reaktor masuk dalam kondisi kritis maka nilai multiplikasi efektif harus lebih dari atau sama dengan 1. Penambahan plutonium-239 pada sel bahan bakar thorium mixed oxyde (Th,Pu)O₂ dapat meningkatkan nilai faktor multiplikasi efektif. Dalam grafik terlihat bahwa jika penambahan plutonium-239 kurang dari 11%, maka kondisi kritis dari reaktor selama 10 tahun belum terpenuhi. Pada penambahan plutonium-239 sebesar 10,5% nilai $k_{eff} > 1$ hanya terjadi sampai tahun ke-8 dan tahun berikutnya mengalami penurunan menjadi 0,995. Penambahan plutonium-239 sebesar 11% menghasilkan nilai $k_{eff} > 1$ ($k_{eff} = 1,1$) pada tahun pertama dan berikutnya mengalami penurunan menjadi $k_{eff} = 1.001$ di tahun ke-10) sehingga reaktor dapat dikatakan dalam kondisi kritis selama 10 tahun waktu burnup. Plutonium-239 bersifat fisil sehingga dapat mengalami reaksi fisi yang menghasilkan energi dan melepaskan sejumlah

neutron baru. Penambahan konsentrasi plutonium-239 pada sel bahan bakar menyebabkan jumlah reaksi fisi penghasil neutron juga meningkat sehingga terjadi kenaikan pada nilai k_{eff} .

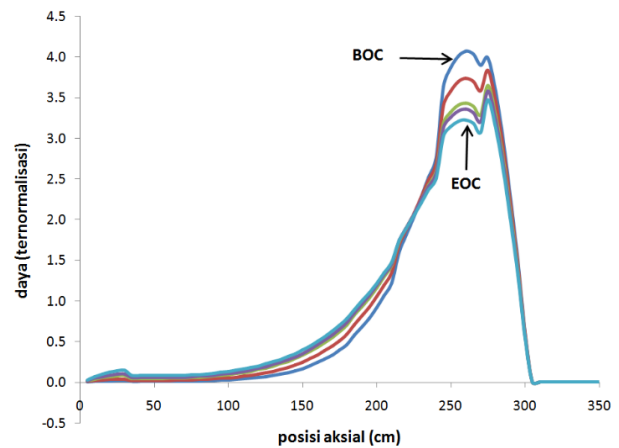
Aspek neutronik berikutnya adalah perhitungan rapat daya dalam teras reaktor. Profil distribusi daya di dalam teras reaktor dapat disajikan dalam arah radial dan aksial. Gambar 5 menunjukkan distribusi daya (persebaran daya yang terjadi secara horizontal) arah radial pada teras reaktor untuk penambahan 11% plutonium-239. Nilai variabel untuk kerapatan daya pada grafik ditampilkan dalam bentuk nilai yang ternormalisasi dengan nilai rapat daya rata-rata yaitu 95 watt/cc. Dalam arah radial kerapatan daya tertinggi terjadi di pusat teras reaktor yaitu sebesar 2,204 (ternormalisasi) yang berarti sama dengan 209,38 watt/cc. Kerapatan daya rata-rata (dalam arah radial) bernilai 1,29 (ternormalisasi) sehingga bernilai 122,65 watt/cc. Penurunan nilai terjadi secara perlahan hingga posisi radial 50 cm. Selanjutnya terjadi penurunan drastis hingga posisi 100 cm, yaitu 0,089 (ternormalisasi) pada ujung teras aktif radial. Pada posisi 105 cm hingga ke tepi yang merupakan tebal reflektor arah radial, kerapatan daya bernilai nol. Hal ini terjadi karena tidak ada energi panas yang dibangkitkan pada daerah reflektor.



Gambar 5. Distribusi daya arah radial untuk penambahan 11% plutonium-239 selama waktu operasi 10 tahun

Kondisi ideal dari profil distribusi daya adalah berbentuk flat, dengan nilai sama di tiap titik arah radial. Keadaan distribusi daya yang merata dicapai jika perbandingan antara nilai daya maksimum dengan nilai daya rata-rata mendekati nilai 1. Namun dari grafik Gambar 5 terlihat jika ditinjau dari profil daya arah radial maka reaktor belum mencapai kondisi ideal. Pada perhitungan rasio antara puncak dengan daya rata-rata (dalam arah radial) diperoleh nilai 1,71. Hal ini menandakan bahwa distribusi daya dalam teras reaktor belum merata karena nilainya >1 . Kecepatan *burn-up* bahan bakar

yang terjadi di bagian tengah teras memiliki perbedaan yang cukup besar dengan di bagian pinggir sehingga terjadi distribusi daya yang tidak merata. Untuk memperoleh profil distribusi yang flat atau rata maka perlu dilakukan beberapa modifikasi terhadap teras untuk mereduksi nilai tersebut. Hal yang perlu diperhatikan dalam penyusunan komposisi bahan bakar di sepanjang teras adalah faktor kecepatan pembakaran dari setiap jenis bahan bakar yang digunakan. Keseimbangan fluks neutron di sepanjang teras arah radial menjadikan profil densitas daya lebih rata (*flat*).



Gambar 6. Distribusi daya arah aksial untuk penambahan 11% plutonium-239 selama waktu operasi 10 tahun

Gambar 6 menunjukkan bahwa dalam 1 siklus selama 10 tahun, distribusi daya arah aksial untuk penambahan plutonium-239 sebesar 11% dari awal siklus (*begin of cycle*, BOC) mengalami sedikit pergeseran kerapatan daya ke arah bahan bakar yang lebih sedikit level *burn-up*-nya yaitu di akhir siklus (*end of cycle*, EOC). Meskipun nilai puncak daya juga mengalami penurunan, namun reaktor tetap dapat mempertahankan kondisi kritis selama 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar.

4 KESIMPULAN

Telah dilakukan studi analisis reaktor cepat berpendingin helium dengan skema *burn-up* MCANDLE aksial berbasis bahan bakar thorium, menggunakan fraksi volume 60% *fuel*, 10% *cladding* dan 30% *coolant*. Input bahan bakar thorium mixed oxyde dengan presentase plutonium-239 sebanyak 11% dapat menghasilkan reaktor yang kritis selama 10 tahun. Nilai $k_{eff} = 1,1$ ditahun pertama burnup dan nilai $k_{eff} = 1.001$ di tahun ke-10. Rasio antara puncak dengan daya rata-rata (dalam arah radial) memiliki nilai 1,71. Hal ini menandakan bahwa distribu-

si daya dalam teras reaktor belum merata karena nilainya >1 . Meskipun distribusi daya arah aksial dari awal siklus mengalami sedikit pergeseran dan penurunan kerapatan daya ke arah di akhir siklus (*end of cycle*, EOC) namun reaktor tetap dapat mempertahankan kondisi kritis selama 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar.

REFERENSI

- [1] Elinur, Priyarsono, D.S., Tambunan, M., Firdaus, M., 2010. *Perkembangan Konsumsi dan Penyediaan Energi dalam Perekonomian Indonesia*. Indonesian Journal of Agricultural Economics, Vol. 2 (1): 97-119.
- [2] Dewan Energi Nasional, 2020, *Hingga Juni 2020 Kapasitas Pembangkit di Indonesia 71 GW*, Jakarta: Kementerian Energi Sumber Daya Mineral.
- [3] Anggoro, Y. D., Nurlaila, D. D. dan Yuliyanto, A. T., 2013. *Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV*. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir 2(15): 72-73.
- [4] Duderstadt, J dan Hamilton. *Nuclear Reactor Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 650 pp. 1976.
- [5] BATAN, 2019, *Proses Produksi Bahan Bakar*, Jakarta: PPID Badan Riset dan Inovasi Nasional.
- [6] Ismail, 2011. Studi Teoretik Bahan Bakar Nuklir Thorium (I) Performa Teras Reaktor Berpendingin Gas Suhu Tinggi (HTGR) Berbahan Bakar Thorium. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV*: 2011. Hal. 399-406.
- [7] Ariani, M., F. Monado., Supardi., Z.Su'ud. 2015. Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar Pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Untuk PLTN. *Prosiding SEMIRATA 2015*, hal 39-45. Universitas Tanjung Pura.
- [8] Ariani, M., Z. Su'ud, Waris, A., Khairurrijal, dan F. Monado. 2012. The Feasibility Study of Small Long-Life Gas Cooled Fast Reactor with Mixed Natural Uranium/Thorium as Fuel Cycle Input. *AIP Conference Proceeding Vol.1448*, hal.59-64.
- [9] Dewita, E., 2012. Analisis Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol. 14 (1): 45-56.
- [10] K.Okumura, et.al. *SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan: Japan Atomic Energy Agency, 313 pp. 2007.
-