

Studi Mengenai Pengaruh *Enrichment* terhadap Aspek Neutronik pada *High Temperature Gas Reactor* (HTGR) dengan Daya 50 MWt Berbahan Bakar UO_2 dan ThO_2

Ayu Lia Pratama^{1,a)} dan Dwi Irwanto^{2,b)}

¹Program Studi Fisika
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Laboratorium Fisika Nuklir,
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} ayuliapratamaa@gmail.com (corresponding author)

^{b)} dirwanto@fi.itb.ac.id

Abstrak

High Temperature Gas Reactor (HTGR) merupakan reaktor generasi IV yang merupakan reaktor berpendingin gas Helium dan memiliki luaran temperatur yang tinggi. Temperatur yang tinggi ini selain dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, dapat juga digunakan untuk memproduksi hidrogen, memurnikan air laut, untuk memperkaya batu bara, dan berbagai proses industri lainnya. Penelitian ini menggunakan metode deterministic untuk menyelesaikan persamaan difusi yang diaplikasikan pada software SRAC2006 yang dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Agency (JAEA) dengan basis data nuklir yang digunakan adalah JENDL4.0. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh enrichment terhadap aspek neutronik pada HTGR yang berbahan bakar UO_2 dan ThO_2 dengan daya 50 MWt. Analisa dilakukan untuk variasi enrichment bahan bakar antara 1% hingga 20%. Parameter-parameter neutronik yang ditinjau pada penelitian ini diantaranya adalah k_{inf} , conversion ratio (CR), burn-up, pola perubahan densitas material fisil dan fertil, dan spektrum neutron. Kemudian, analisa dilanjutkan untuk perbandingan karakteristik neutronik HTGR 50 MWt berbahan bakar UO_2 dan ThO_2 .

Kata-kata kunci: HTGR, enrichment, neutronik.

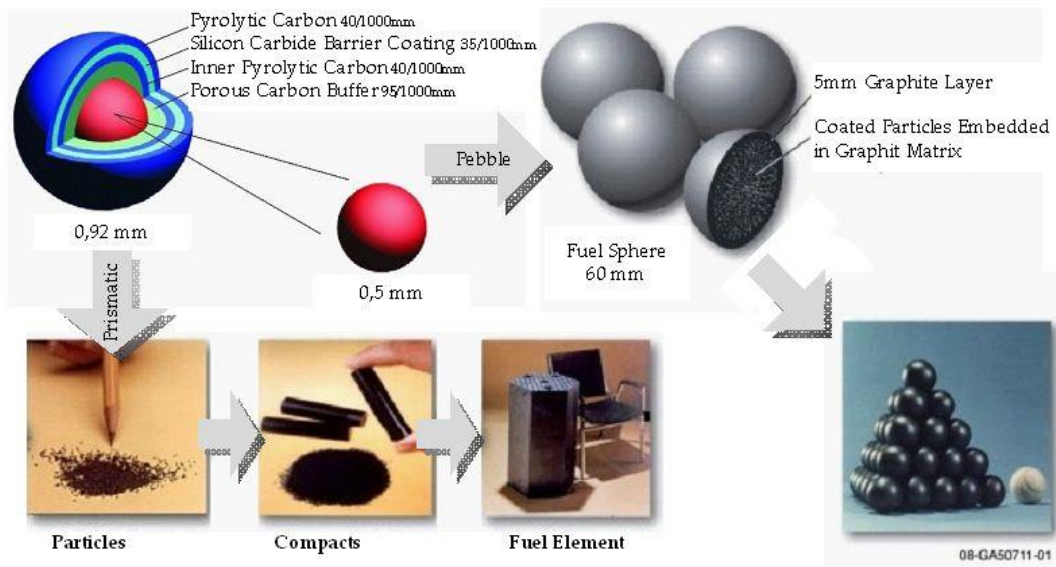
PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia yang memiliki lebih dari 17.000 pulau, baik yang besar maupun yang kecil. Kebutuhan energi di pulau-pulau Indonesia dari hari ke hari semakin menipis dan mulai memasuki tahap kritis, khususnya di luar Pulau Jawa. Hal ini terbukti dari sering terjadinya pemadaman listrik bergilir di beberapa daerah, seperti di Pulau Sumatera dan Kalimantan. Kebutuhan energi listrik dalam skala besar untuk mendukung peningkatan ekonomi nasional sangat dibutuhkan. Mengingat cadangan batu bara yang dijadikan sebagai sumber energi listrik andalan semakin menipis. Maka untuk memenuhi kebutuhan tersebut, pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) bisa dijadikan sebagai salah satu solusi. Tidak seperti penggunaan batu bara, dari segi lingkungan, penggunaan energi

nuklir tidak mengemisikan karbondioksida (CO₂) yang merupakan penyebab efek rumah kaca yang menjadi masalah utama bagi negara kepulauan seperti Indonesia. [1]

High Temperature Gas Reactor (HTGR) merupakan reaktor generasi IV yang berpendingin gas, bermoderator grafit, memiliki temperatur yang sangat tinggi, dan partikel bahan bakar berlapis TRISO yang terdiri dari empat lapisan, yaitu *Pyrolytic Carbon* (PyC) berdensitas rendah pada bagian paling dalam, *Pyrolytic Carbon* densitas tinggi (IPyC), *Silicon Carbide* (SiC), dan *Pyrolytic Carbon* densitas tinggi pada bagian luar (OPyC). Pemanfaatan temperatur yang tinggi ini selain digunakan untuk menghasilkan listrik dapat juga digunakan untuk memproduksi hidrogen, memurnikan air laut, memperkaya batu bara, dan berbagai proses industri lainnya. Pembangkit listrik dengan menggunakan HTGR 50 MWt ini cocok untuk kondisi geografis kepulauan Indonesia yang sulit digabungkan dalam satu jaringan listrik besar.

Terdapat dua jenis bahan bakar pada HTGR yaitu *pebble ball* dan prismatic. Pada bahan bakar tipe *pebble ball*, partikel TRISO ditenamkan pada kulit grafit berbentuk bola, sedangkan pada desain prismatic partikel TRISO dikompaksi memanjang. Perbedaan kedua tipe bahan tersebut seperti terlihat pada gambar 1 berikut



Gambar 1. Tipe bahan bakar *pebble ball* dan prismatic pada HTGR [2]

Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh *enrichment* terhadap aspek neutronik pada HTGR yang berbahan bakar UO₂ dan ThO₂ dengan daya 50 MWt. Analisa dilakukan untuk variasi *enrichment* bahan bakar antara 1% hingga 20%. Desain HTGR yang digunakan diadopsi dari desain *High Temperature Test Reactor* (HTTR).[3]

METODE PENELITIAN

Perhitungan analisis neutronik reaktor nuklir dengan menggunakan persamaan transport atau persamaan difusi multidimensi sangat sulit untuk dilakukan secara manual, sehingga dibutuhkan program untuk melakukan proses perhitungan tersebut. Pada penelitian ini digunakan program SRAC2006 [4] dengan basis data nuklir JENDL4.0. [5]

SRAC2006 merupakan sebuah program yang digunakan untuk menganalisis sistem reaktor dengan menggunakan metoda difusi yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA). Untuk melakukan perhitungan, diperlukan data-data awal sebagai input yang mencakup dimensi bahan bakar, *atomic density* material bahan bakar, material *cladding*, dan bahan pendingin.

Spesifikasi reaktor dan spesifikasi bahan bakar yang digunakan pada perhitungan diadopsi dari parameter HTTR [6][7] dengan melakukan peningkatan daya dari 30 MWt menjadi 50 MWt, seperti terlihat pada tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Spesifikasi HTGR 50MWt

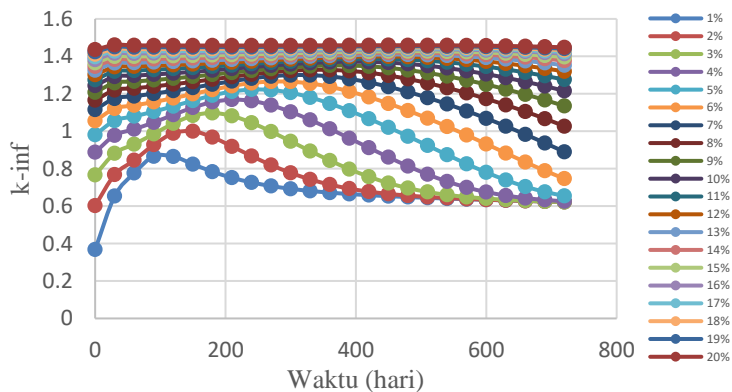
Parameter pada reaktor	Spesifikasi
Daya termal	50 MW
Suhu outlet pendingin	950 °C
Suhu inlet pendingin	395 °C
Tekanan pendingin primer	4 MPa
Material penyusun teras	Grafit
Material pendingin	Gas Helium
Diameter teras (ekuivalen)	2,3 m
Tinggi teras efektif	2.9 m
Enrichment bahan bakar	1-20 wt%
Periode burn-up	720 hari

Tabel 2. Spesifikasi bahan bakar

Parameter bahan bakar	Spesifikasi
Diameter kernel	0.5 cm
Diameter CFP	0.091 cm
Diameter dalam <i>compact</i>	1 cm
Diameter luar <i>compact</i>	2.6 cm

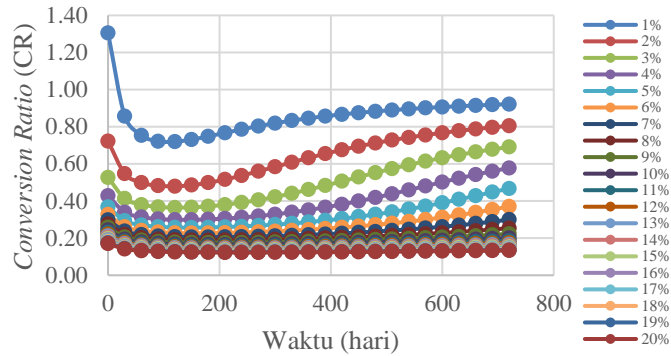
DATA DAN ANALISIS

Perhitungan dilakukan untuk mengetahui pengaruh *enrichment* dan untuk mendapat nilai yang optimum pada bahan bakar Uranium dan Thorium untuk HTGR prismatik 50MWt. Batasan yang diberikan yaitu target operasi selamat dua tahun dan *enrichment* yang digunakan adalah 1-20 wt%. Nilai variasi maksimum *enrichment* 20 wt% didasarkan pada batas kesepakatan maksimum *enrichment* dapat dipakai pada reaktor komersial. Data hasil perhitungan variasi *enrichment* untuk bahan bakar Uranium diberikan pada gambar 2.



Gambar 2. Nilai k-inf untuk HTGR 50 MWt berbahan bakar Uranium dengan variasi nilai *enrichment* dari 1-20 wt%

Faktor multiplikasi infinit (k_{inf}) merupakan perbandingan jumlah neutron pada satu generasi terhadap generasi sebelumnya tanpa memperhitungkan faktor kebocoran. Dari grafik k_{inf} untuk bahan bakar Uranium, yang memenuhi target operasi dua tahun adalah bahan bakar dengan *enrichment* lebih besar dari 9 wt%. Untuk *enrichment* kurang dari 9 wt% terlihat bahwa reaktor telah mencapai kondisi subkritis ($k_{inf} < 1$) sebelum akhir masa operasi. Nilai *enrichment* optimum untuk kasus ini adalah 10 wt% yang memberikan masa operasi sesuai target dan margin kriticalitas yang cukup ketika faktor kebocoran neutron diperhitungkan. Nilai *enrichment* di atas 10 wt% memenuhi target masa operasi namun faktor ekonomis menjadi salah satu parameter yang dipertimbangkan mengingat biaya pengayaan yang tidak murah.



Gambar 3. Nilai *Conversion Ratio* (CR) untuk HTGR 50 MWt berbahan bakar Uranium dengan variasi nilai *enrichment* dari 1-20 wt%

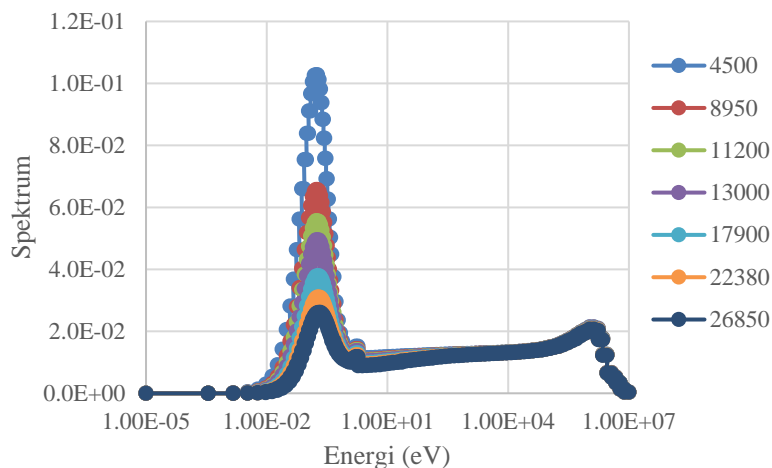
Conversion ratio (CR) merupakan perbandingan jumlah fisil yang diproduksi dengan jumlah fisil yang dipakai. Dari hasil perhitungan yang terlihat pada gambar 3, didapatkan bahwa secara umum, semakin tinggi nilai *enrichment* maka nilai CR akan semakin kecil.

Selain dilakukan perhitungan untuk mendapatkan *enrichment* yang optimum, dilakukan juga perhitungan untuk mendapatkan nilai *Coated Fuel Particle* (CFP) optimum untuk HTGR 50MWt yang memberikan jumlah material fisil paling banyak terpakai di akhir masa operasi (*fuel economic* tinggi). Batasan yang diberikan yaitu target operasi dua tahun dan *enrichment* yang digunakan adalah 10 wt% yang didapatkan dari perhitungan variasi *enrichment* sebelumnya. Jumlah CFP yang digunakan terlihat pada tabel 3.

Tabel 3. Data variasi jumlah CFP

Jumlah CFP	Persentase kernel	Persentase CFP
4.500	1.67%	10%
8.950	3.32%	20%
11.200	4.15%	25%
13.000	4.42%	30%
17.900	6.64%	40%
22.380	8.3%	50%
26.850	9.96%	60%

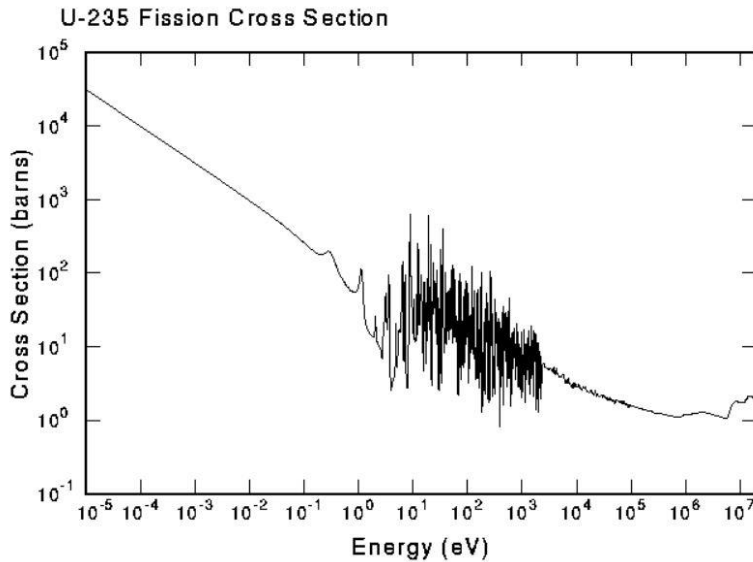
Data hasil perhitungan variasi jumlah CFP adalah sebagai berikut.



Gambar 4. Spektrum neutron HTGR 50 MWt berbahan bakar Uranium untuk jumlah CFP yang berbeda

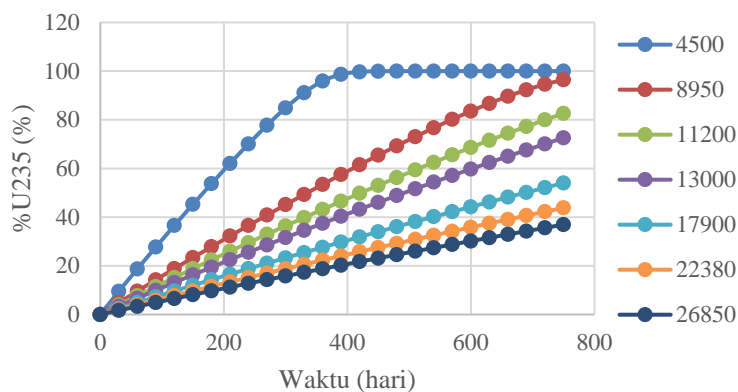
Parameter lain yang menjadi perhatian dalam penelitian ini adalah distribusi fluks neutron. Fluks neutron diartikan sebagai jumlah neutron yang dihasilkan reaktor per satuan luas dan waktu. Perhitungan fluks neutron dilakukan untuk mengetahui banyaknya neutron yang dihasilkan oleh reaktor pada tingkat

energi tertentu. Spektrum neutron merupakan distribusi energi neutron, dengan arti lain, spektrum neutron ialah fluks neutron sebagai fungsi dari energi. Dari grafik tersebut didapatkan bahwa semakin sedikit jumlah CFP maka nilai spektrum neutron pada energi termal akan semakin tinggi. Saat jumlah CFP sedikit maka jumlah moderatornya lebih banyak yang berdampak pada perbandingan *fuel* terhadap moderatornya menjadi kecil. Hal ini mengakibatkan lebih banyak neutron akan termoderasi sehingga didapatkan nilai spektrum neutron yang tinggi pada energi yang rendah seperti terlihat pada gambar 4. Jika dilihat dari grafik penampang lintang mikroskopik fisi U-235, pada gambar 5, terlihat bahwa nilai *cross section fisi* pada energi 10^{-1} eV memiliki nilai yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa peluang U-235 untuk melakukan reaksi fisi pun akan tinggi.



Gambar 5. Penampang lintang mikroskopik fisi U-235 [8]

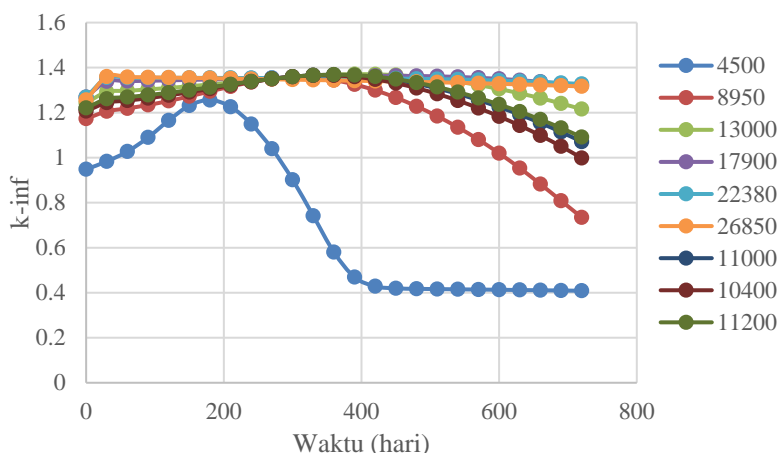
Selain ditinjau dari grafik spektrum neutron, untuk mengetahui efek variasi jumlah CFP juga dapat dilihat dari grafik persentase U-235 yang terpakai. Grafik persentase U-235 yang terpakai untuk setiap jumlah CFP yang berbeda terdapat pada gambar 6 berikut.



Gambar 6. Persentase U-235 yang terpakai selama masa operasi reaktor

Dari gambar 6 terlihat bahwa untuk jumlah CFP paling kecil (4.500) pada hari ke-400 semua bahan bakarnya telah habis terpakai sehingga hal ini tidak memenuhi target operasi dua tahun. Untuk jumlah CFP 8.950 di akhir periode operasi jumlah bahan bakar yang terpakai tinggi, yang berarti memiliki nilai *fuel economic* yang tinggi. Namun jika dilihat pada grafik k-inf untuk jumlah CFP yang berbeda (gambar 7), jumlah CFP 8.950 tidak memenuhi target operasi. Sedangkan untuk jumlah CFP 11.200 memenuhi target operasi dan persentase *fuel* yang terpakai di akhir periode memiliki nilai yang relatif tinggi, yaitu 82%.

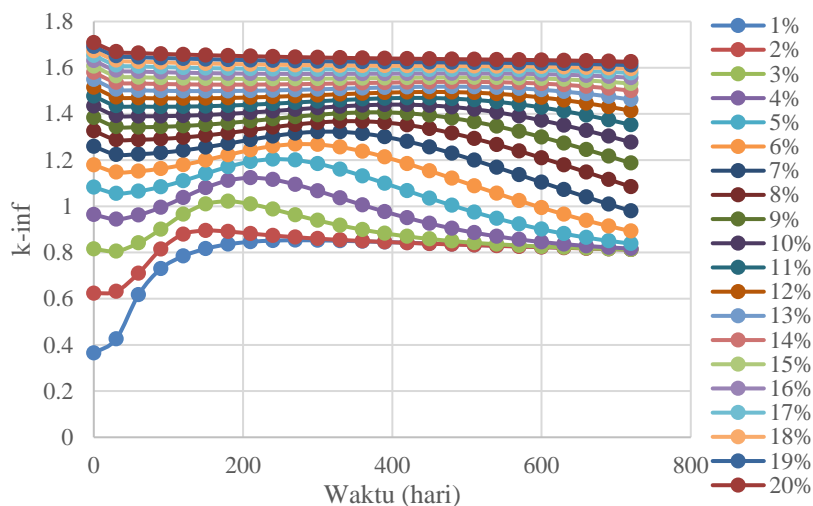
Sehingga jumlah CFP sebanyak 11.200 memiliki nilai *fuel economic* dan tetap memenuhi target masa operasi, sesuai dengan tujuan yang diinginkan dari variasi CFP.



Gambar 7. Nilai k-inf untuk HTGR 50 MWt berbahan bakar Uranium dengan variasi jumlah CFP

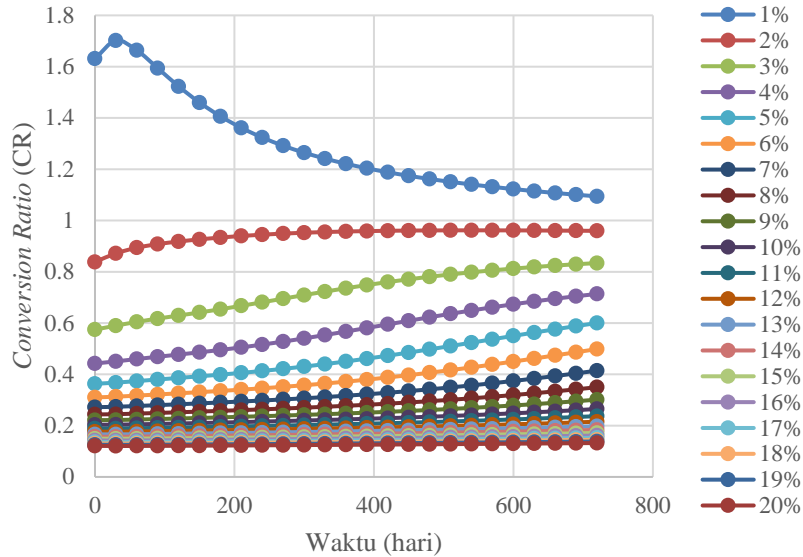
Dari gambar 7, terlihat bahwa untuk jumlah CFP 4.500 tidak memenuhi target operasi dan grafiknya turun drastis sampai pada hari ke-400. Penurunan yang drastis ini dikarenakan tidak ada lagi material fisil yang dihasilkan. Jumlah CFP 11.200 memenuhi target operasi yang diinginkan. Untuk jumlah CFP >11.200 juga memenuhi target operasi, namun jika dilihat pada grafik persentase U-235 nilai persentase bahan bakar yang dipakai di akhir periode sangat sedikit sehingga memiliki nilai *fuel economic* yang relatif rendah.

Pada penelitian ini, ditinjau pula tipe bahan bakar yang menggunakan Thorium dioxide (ThO₂). Pada bahan bakar Thorium dengan variasi *enrichment*, batasan yang dipakai sama dengan batasan pada yang dipakai ketika menggunakan bahan bakar Uranium. Grafik k-inf untuk bahan bakar Thorium terlihat pada gambar 8 berikut.



Gambar 8. k-inf untuk bahan bakar Thorium dengan variasi nilai enrichment

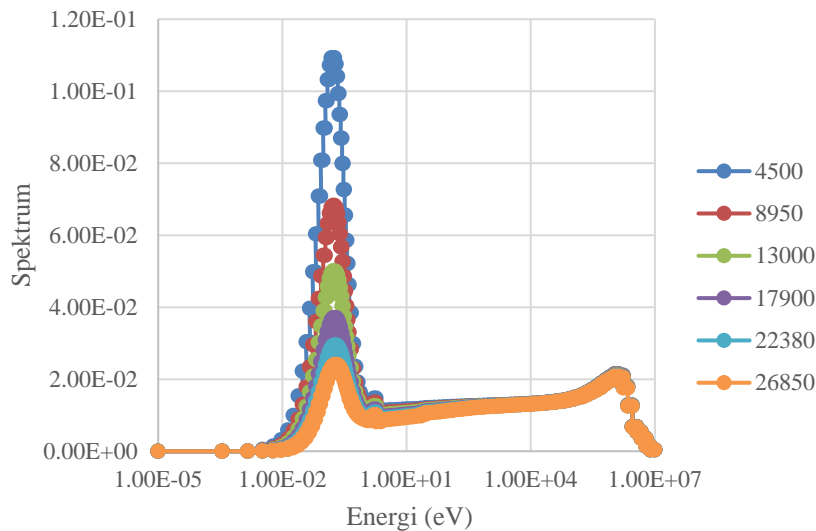
Nilai *enrichment* yang memenuhi target operasi jika dilihat dari grafik k-inf Thorium adalah *enrichment* yang bernilai >8 wt%. Dalam penelitian ini, dipilih *enrichment* 9 wt% sebagai *enrichment* acuan karena memiliki nilai k-inf yang cukup untuk memenuhi target masa operasi.



Gambar 9. Nilai *Conversion Ratio* (CR) HTGR 50 MWt bahan bakar Thorium untuk variasi *enrichment* yang berbeda

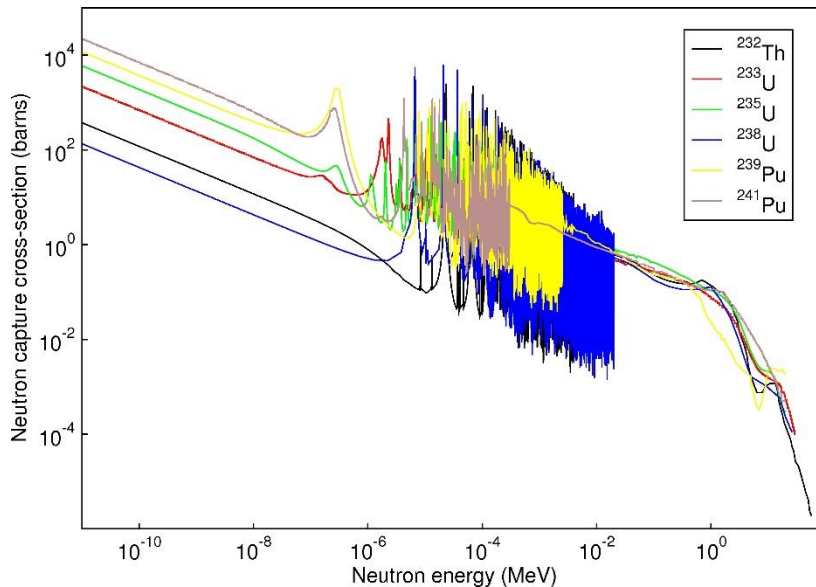
Gambar 9 memberikan informasi besarnya CR untuk bahan bakar Thorium. Jika dibandingkan dengan nilai CR untuk bahan bakar Uranium, terlihat bahwa nilai CR untuk Thorium memiliki nilai yang lebih tinggi.

Selain melakukan perhitungan variasi *enrichment* dilakukan juga perhitungan variasi jumlah *Coated Fuel Particle* (CFP). Jumlah CFP Thorium yang divariasikan sama dengan variasi jumlah CFP Uranium pada tabel 3. Batasan yang dipakai untuk variasi jumlah CFP Thorium sama seperti pada Uranium yaitu target operasi dua tahun, namun untuk *enrichment* yang dipakai adalah 9 wt% seperti yang didapatkan dari grafik k-inf.



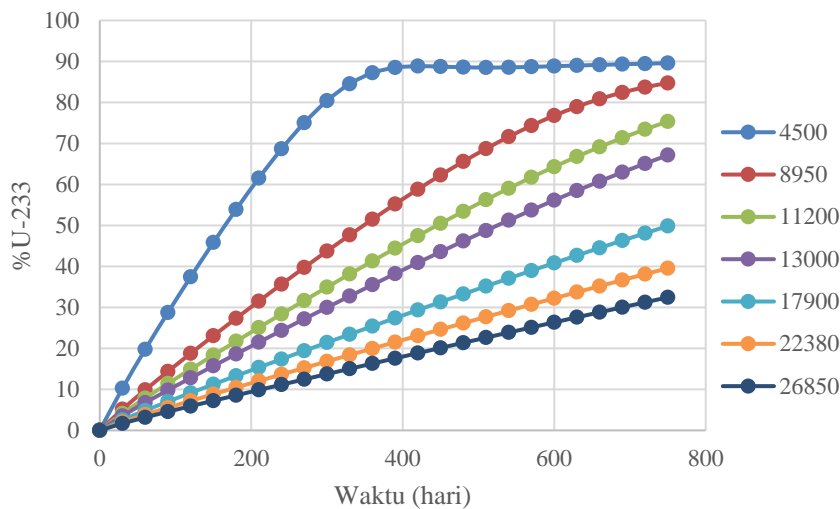
Gambar 10. Spektrum neutron HTGR 50 MWt berbahan bakar Thorium untuk jumlah CFP yang berbeda

Dengan jumlah CFP yang sama dengan Uranium, nilai spektrum neutron pada Thorium yang didapatkan bernilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan spektrum neutron pada Uranium, seperti terlihat pada gambar 10. Hal ini disebabkan perbedaan nilai penampang lintang fisi antara kedua bahan bakar yang dipakai. Perbandingan nilai penampang lintang fisi untuk beberapa unsur dapat dilihat pada gambar 11.



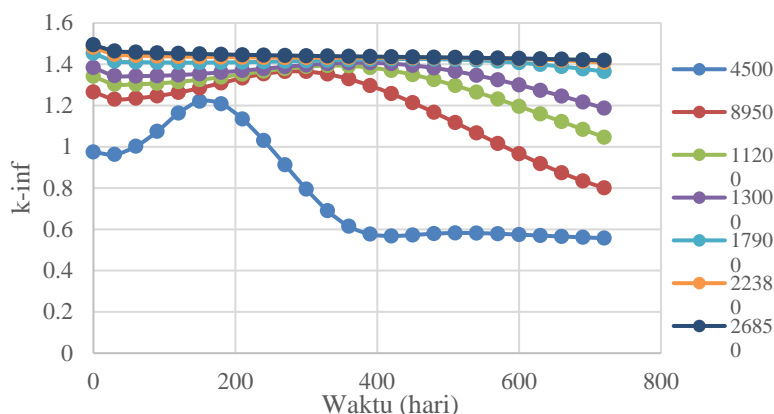
Gambar 11. Penampang lintang mikroskopik fisi untuk isotop Uranium, Thorium, dan Plutonium [9]

Dari gambar 11, didapatkan informasi bahwa penampang lintang mikroskopik fisi untuk U-235 lebih tinggi jika dibandingkan dengan U-233. Hal ini yang membuat persentase U-235 yang terpakai di akhir periode lebih besar jika dibandingkan dengan persentase U-233 yang terpakai.



Gambar 12. Nilai persentase U-233 yang terpakai selama masa operasi

Dari grafik persentase U-233, untuk jumlah CFP Thorium 4.500 hasilnya sama seperti pada Uranium yaitu tidak dapat memenuhi target operasi dua tahun. Sedangkan untuk jumlah CFP 11.200 dapat memenuhi target operasi dan persentase bahan bakar yang terpakai di akhir operasi pun juga terbilang tinggi yaitu sekitar 70% lebih. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah CFP 11.200 memiliki *fuel economic* yang tinggi. Namun jika dibandingkan dengan persentase U-235 yang terpakai nilai persentase U-233 lebih kecil. Hal ini dapat dilihat dari grafik penampang lintang mikroskopik yang menunjukkan bahwa nilai *cross section* U-235 lebih tinggi dari nilai *cross section* U-233.



Gambar 13. Nilai k-inf HTGR 50 MWt berbahan bakar Thorium untuk jumlah CFP yang berbeda

Gambar 13 menunjukkan nilai k-inf untuk bahan bakar Thorium dengan variasi jumlah CFP yang berbeda. Dari grafik tersebut didapatkan bahwa jumlah CFP yang memenuhi target operasi adalah yang bernilai lebih besar dari 8.950, yaitu 11.200, 13.000, 17.900, 22.380, dan 26.850. Namun jumlah CFP yang semakin banyak justru memberikan nilai *fuel economic* yang rendah. Sehingga dari grafik yang terdapat pada gambar 12 dan 13 terlihat bahwa jumlah CFP yang memenuhi target dua tahun dan memiliki nilai *fuel economic* tinggi adalah CFP yang berjumlah 11.200.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini dilakukan analisa efek variasi *enrichment* terhadap parameter-parameter neutronik reaktor tipe HTGR yang memiliki daya 50 MWt. Desain HTGR yang digunakan, mengadopsi HTTR Jepang dengan melakukan *uprating power* dari 30 MWt menjadi 50 MWt dan target operasi selama dua tahun. Hasil analisa yang dilakukan pada level *assembly* (bukan *fuel core*) menunjukkan bahwa nilai *enrichment* yang optimal untuk HTGR prismatic 50 MWt dengan bahan bakar Uranium dioksida adalah 10 wt% dan untuk bahan bakar Thorium dioksida adalah 9 wt%. Dalam penelitian ini pun didapatkan bahwa nilai CFP optimal yang memberikan nilai *fuel economic* yang tinggi untuk Uranium dan Thorium adalah 11.200.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Penelitian ini turut didanai oleh Hibah Riset KK ITB 2017.

REFERENSI

1. *Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources*. 2011. World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/greenhouse-gas-emissions-avoided.aspx> (Diakses : 20 Desember 2017)
2. P.Juliana et al. *Generation IV Nuclear System: State of the Art and Current Trends with Emphasis on Safety and Security Features*. Mesquita, ISBN 978-953-51-0967-9 (2013)
3. N. Fujimoto et al. *Nuclear Design*. Nucl. Eng. Des., 233 23-36 (2004)
4. K. Okumura, T. Kugo, K. Kaneko, and K. Tsuchihashi. *SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. JAEA-Data/Code 2007-004 (2007)
5. K. Shibata et al., *JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineerin*. J. Nucl. Sci. Technol., **48**, 1-30 (2011).
6. T.K.Kim, T.A. Taiwo, and Frank Szakaly. *Evaluation of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) Start-up Experiments*. ANL-GenIV-059 (2005)
7. S. Shiozawa et al. *Overview of HTTR Design Features*. Nucl. Eng. Des., 233 11-21 (2004)
8. *Nuclear Reactions*. <http://t2.lanl.gov/nis/tour/sch002.html> (Diakses : 20 Desember 2017)
9. H. Lylia. *Concept, Instrumentation and Technique of Neutron Activation Analysis*. ISBN 978-953-52-1033-0 (2013)