Studi Efektivitas Pembakaran Material Fisil pada *High Temperature Gas Reactor* (HTGR) Tipe Prismatik Berdaya 50 MWt

Ayu Lia Pratama[1,a)] dan Dwi Irwanto[2,b)]

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

[2]Laboratorium 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 salah satu tipe reaktor Generasi IV berpendingin gas Helium yang memiliki luaran temperatur yang tinggi. Temperatur yang tinggi ini selain dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, dapat pula digunakan untuk memproduksi hidrogren, memurnikan air laut, memperkaya batu bara, dan berbagai proses indrustri lainnya. Pada penelitian ini, efek nilai enrichment dan jumlah Coated Fuel Particle (CFP) terhadap efektivitas pembakaran material fisil untuk tiga buah bahan bakar nuklir yang berbeda; UO_2 *dan* $(U\text{-}Pu)O_2$*, diteliti dan dianalisa. Perhitungan dan analisa dilakukan untuk nilai enrichment antara 1-20% dan jumlah CFP antara 4500 hingga 26850 buah per pellet bahan bakar. Analisa dilakukan pada disain HTGR 50MWt untuk kedua bahan bakar nuklir tersebut dan menghasilkan nilai enrichment optimal sebesar 10% dengan jumlah CFP sebanyak 11500. Dari analisa yang dilakukan pada level assembly, didapatkan nilai keefektifan pembakaran material fisil yang paling tinggi untuk HTGR 50MWt adalah bahan bakar* $(U\text{-}Pu)O_2$ *sebesar lebih dari 92%. Analisa pun dilakukan pada parameter neutronik seperti k-inf, conversion ratio juga perubahan densitas material fisil dan fertil selama dua tahun masa operasi reaktor.*

Kata-kata kunci: bahan bakar, HTGR, material fisil, neutronik

PENDAHULUAN

Salah satu aspek penting dalam pemenuhan kebutuhan hidup manusia adalah ketersediaan energi listrik. Di Indonesia, pertambahan jumlah penduduk dan meningkatnya kehidupan masyarakat menyebabkan kebutuhan energi listrik juga semakin meningkat. Namun sayangnya saat ini masih terdapat daerah yang kekurangan pasokan listrik [1]. Oleh karena itu, pengembangan energi alternatif dan energi terbarukan sangat dibutuhkan, salah satunya yaitu energi nuklir.

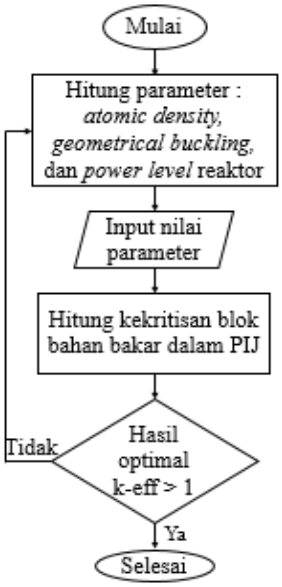
Saat ini pemerintah tengah mengembangkan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) dengan teknologi berbasis *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR). HTGR merupakan salah satu jenis reaktor Generasi IV dengan pendingin gas Helium, moderator berupa grafit, partikel bahan bahar berupa *Coated Fuel Particle* (CFP) berlapis TRISO, dan memiliki luaran temperatur yang sangat tinggi mencapai 1000°C. Temperatur yang sangat tinggi ini selain dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik dapat juga digunakan untuk memurnikan air laut, memperkaya kandungan batu bara, dan memproduksi hidrogen untuk berbagai kebutuhan industri. Pembangkit listrik dengan menggunakan HTGR 50 MWt ini dinilai cocok dibangun di Indonesia mengingat kondisi geografis Indonesia yang terdiri dari pulau-pulau kecil.

Pada penelitian ini, dilakukan studi efektivitas pembakaran material fisil pada HTGR prismatik 50 MWt dengan bahan bakar UO_2 dan $(U\text{-}Pu)O_2$. Survei parameter neutronik dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan optimasi nilai *enrichment* dan jumlah *Coated Fuel Particle* (CFP) untuk kedua jenis bahan bakar. Keefektifan pembakaran material fisil sangat diperlukan karena bahan bakar yang digunakan pada HTGR berupa CFP yang sangat kecil dan berlapis sehingga pengolahan ulang bahan bakar sulit untuk dilakukan. Maka dari itu, pada penelitian ini dilakukan optimasi parameter neutronik untuk mendapatkan pembakaran material fisil yang efektif dilihat dari persentase material fisil yang terpakai sepanjang periode operasi bernilai tinggi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini difokuskan pada analisa neutronik dengan metode deterministik untuk menyelesaikan persamaan transport dan difusi yang diaplikasikan pada *software* SRAC *(Standard Reactor Analysis Code)* versi 2006 [2] yang dikembangkan oleh JAEA *(Japan Atomic Energy Agency)* dengan basis data nuklir yang digunakan adalah JENDL4.0 [3].

Untuk melakukan perhitungan, diperlukan data-data awal sebagai input yang mencakup dimensi bahan bakar, jenis material bahan bakar, *atomic density* bahan bakar, *geometrical buckling, power level,* material *cladding*, dan bahan pendingin. Perhitungan parameter input dilakukan pada program Excel dan untuk ploting data hasil perhitungan dilakukan pada program OriginPro. Skema perhitungan neutronik menggunakan SRAC2006 adalah sebagai pada gambar 1 berikut :



Gambar 1. Skema perhitungan neutronik menggunakan SRAC2006

Parameter-parameter yang digunakan pada perhitungan diadopsi dari parameter *High Temperature Test Reactor* (HTTR) [4] dengan melakukan peningkatan daya dari 30 MWt menjadi 50 MWt, seperti terlihat pada tabel 1 dan 2. HTTR merupakan jenis HTGR pertama yang dibangun di Jepang oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) pada tahun 1992 dan mencapai kritis pertama pada 10 November 1998.

Tabel 1. Spesifikasi bahan bakar HTGR prismatik 50 MWt

Parameter bahan bakar	**Spesifikasi**
Diameter kernel	0.5 cm
Diameter CFP	0.091 cm
Diameter dalam *compact*	1 cm
Diameter luar *compact*	2.6 cm

Tabel 2. Spesifikasi desain HTGR prismatik 50MWt

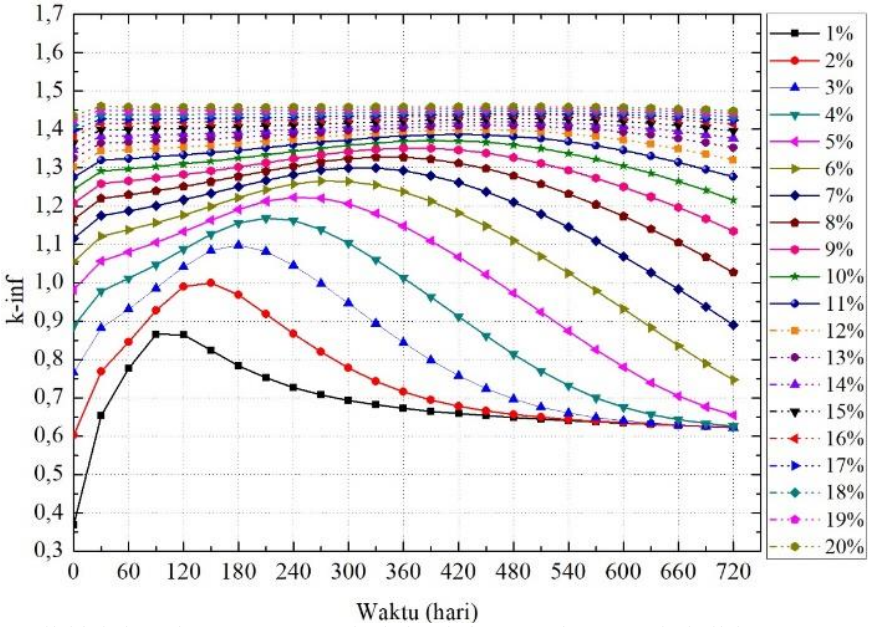
Parameter pada reaktor	**Spesifikasi**

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

DATA DAN ANALISIS

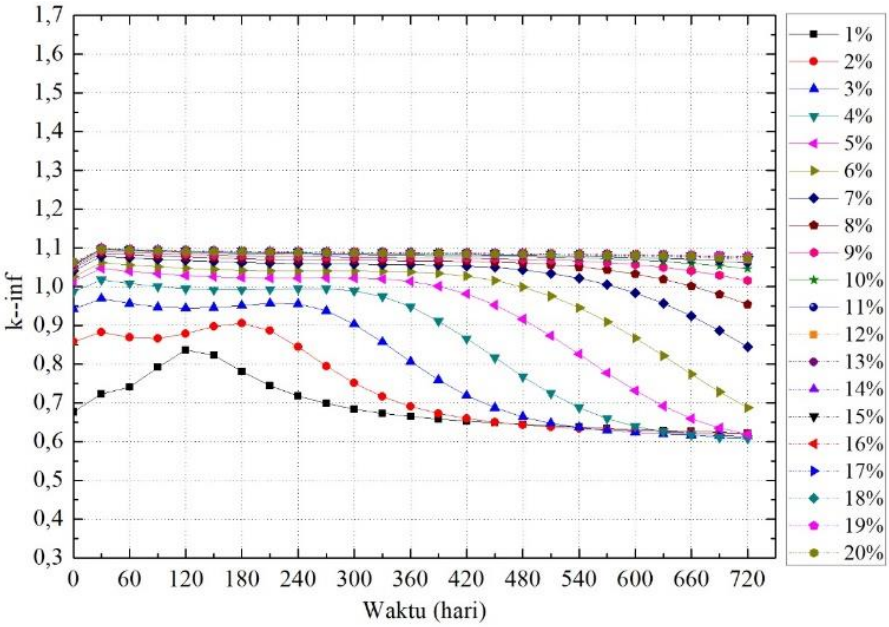
Hasil Variasi *Enrichment*

Perhitungan dilakukan untuk mengetahui pengaruh *enrichment* dan untuk mendapat nilai yang optimum pada bahan bakar UO_2 dan $(U\text{-}Pu)O_2$ untuk HTGR prismatik 50MWt. Batasan yang diberikan yaitu target operasi selamat dua tahun dan *enrichment* yang digunakan adalah 1-20%. Nilai variasi maksimum *enrichment* 20% didasarkan pada batas kesepakatan maksimum *enrichment* dapat dipakai pada reaktor komersial. Nilai k-inf dari data hasil perhitungan variasi *enrichment* untuk bahan bakar UO_2 dan $(U\text{-}Pu)O_2$ berturut-turut ditunjukkan pada gambar 2 dan 3 berikut :



Gambar 2. Nilai k-inf untuk HTGR 50 MWt berbahan bakar UO_2 dengan variasi nilai *enrichment* dari 1-20%

 ISBN: 978-602-61045-4-0



Gambar 3. Nilai k-inf untuk HTGR 50 MWt berbahan bakar (U-Pu)O_2 dengan variasi nilai *enrichment* dari 1-20%

Faktor multiplikasi infinit (k-inf) merupakan perbandingan jumlah neutron pada suatu generasi dengan generasi sebelumnya tanpa memperhitungkan faktor kebocoran. Dari grafik k-inf yang terlihat pada gambar 2 dan 3, untuk kedua bahan bakar pada *enrichment* kecil mengalami kenaikan yang cukup tinggi di awal kemudian menurun hingga akhir periode. Sedangkan untuk *enrichment* tinggi, nilai k-inf di awal periode operasi tidak mengalami kenaikan yang tinggi. Untuk kedua jenis bahan bakar yang memenuhi target operasi dua tahun adalah bahan bakar dengan *enrichment* lebih besar dari 9%. Saat *enrichment* kurang dari 9% terlihat bahwa reaktor telah mencapai kondisi subkritis (k-inf < 1) sebelum akhir masa operasi. Sedangkan nilai *enrichment* di atas 10% memenuhi target masa operasi namun faktor ekonomis menjadi salah satu parameter yang dipertimbangkan terkait biaya pengayaan yang tidak murah. Sehingga nilai *enrichment* optimum untuk kedua bahan bakar adalah 10% yang memberikan masa operasi sesuai target dan margin kritikalitas yang cukup ketika faktor kebocoran neutron diperhitungkan.

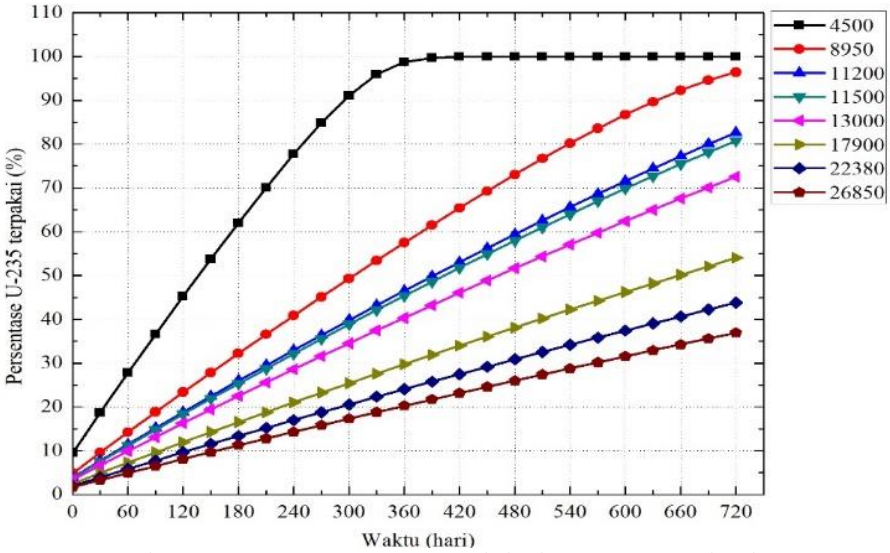
Hasil Variasi Jumlah *Coated Fuel Particle* (CFP)

Selain dilakukan optimasi nilai *enrichment*, dilakukan juga optimasi jumlah *Coated Fuel Particle* (CFP) pada HTGR 50MWt pada level *assembly* untuk mendapatkan pembakaran material fisil yang efektif dilihat dari persentase material fisil yang terpakai sepanjang periode operasi bernilai tinggi. Batasan yang diberikan yaitu target operasi selama dua tahun dan *enrichment* yang digunakan adalah 10 wt% yang didapatkan dari perhitungan variasi *enrichment* sebelumnya. Variasi jumlah CFP yang digunakan terlihat pada tabel 3.

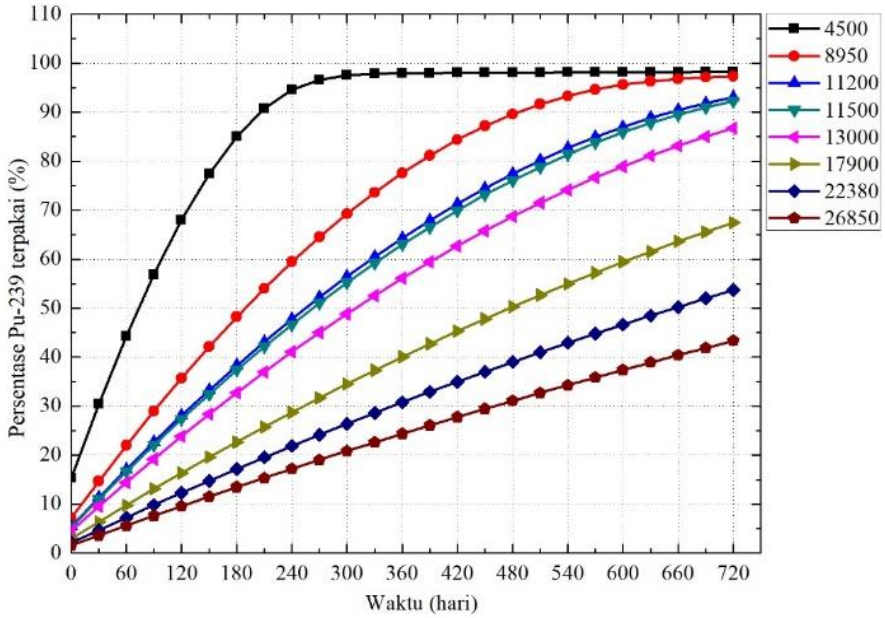
Tabel 3. Data variasi jumlah CFP

Jumlah CFP	Persentase kernel	Persentase CFP
4500	1,67%	10%
8950	3,32%	20%
11200	4,15%	25%
11500	4,26%	26%
13000	4,42%	30%
17900	6,64%	40%
22380	8,3%	50%
26850	9,96%	60%

Efek variasi jumlah CFP dapat dilihat dari jumlah persentase U-235 dan Pu-239 yang terpakai. Dari hasil analisa, persentase U-235 dan Pu-239 yang terpakai untuk setiap jumlah CFP yang berbeda dapat dilihat pada gambar 4 dan 5 berikut.



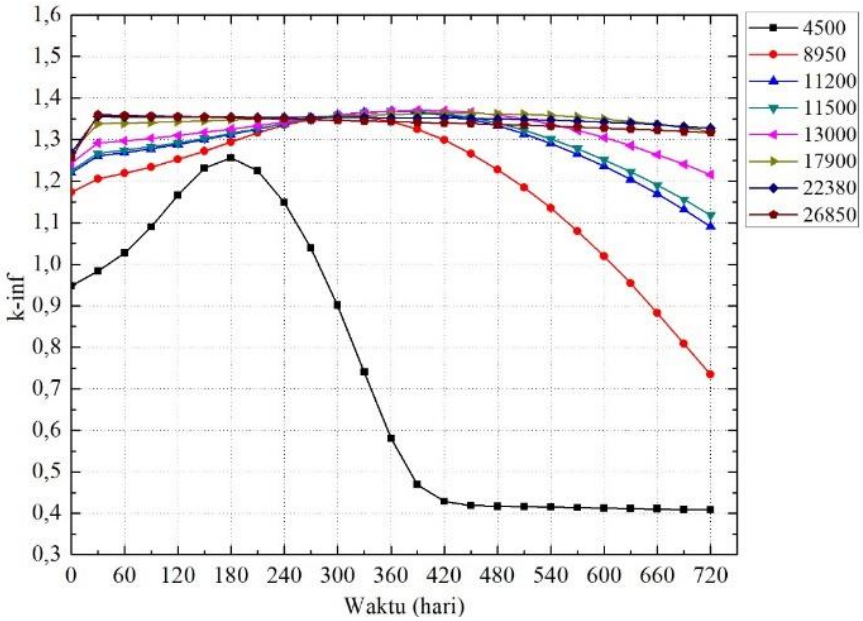
Gambar 4. Persentase U-235 yang terpakai selama masa operasi reaktor



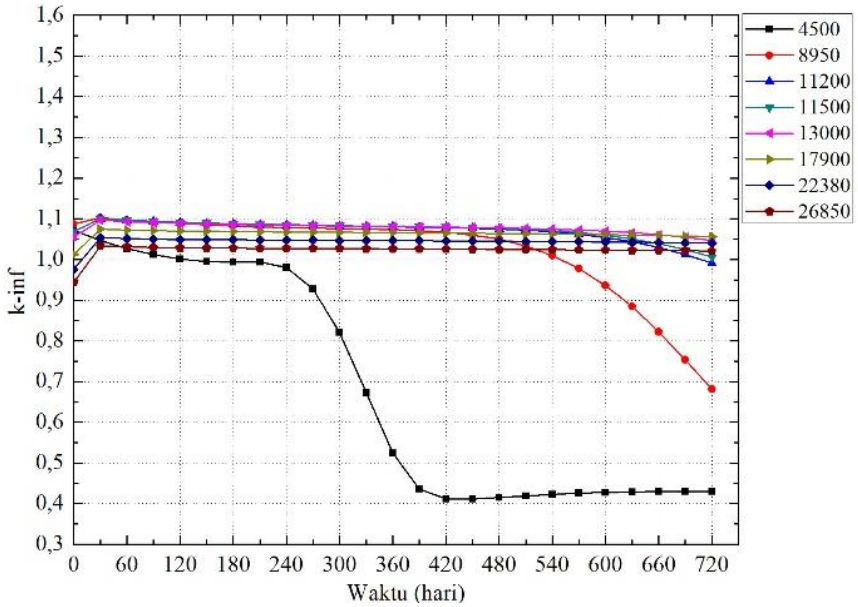
Gambar 5. Persentase Pu-239 yang terpakai selama masa operasi reaktor

Dari gambar 4 dan 5 terlihat bahwa untuk jumlah CFP paling kecil (4.500) untuk bahan bakar UO_2 dan $(U\text{-}Pu)O_2$ pada hari ke-400 semua bahan bakarnya telah habis terpakai sehingga hal ini tidak memenuhi target operasi dua tahun. Untuk jumlah CFP 8950 di akhir periode operasi jumlah bahan bakar yang terpakai tinggi, yang berarti pembakaran material fisil sangat efektif. Namun jika dilihat pada grafik k-inf untuk jumlah CFP yang berbeda pada kedua bahan bakar (gambar 6 dan 7), jumlah CFP 8950 tidak memenuhi target operasi. Sedangkan untuk jumlah CFP 11500 memenuhi target operasi dan persentase *fuel* yang terpakai di akhir periode memiliki nilai yang relatif tinggi. Sehingga secara umum untuk kedua bahan bakar jumlah CFP sebanyak 11500 memiliki keefektifan pembakaran material fisil yang tinggi dan tetap memenuhi target masa operasi, sesuai dengan tujuan yang diinginkan dari variasi CFP.

 ISBN: 978-602-61045-4-0



Gambar 6. Nilai k-inf untuk HTGR 50 MWt berbahan bakar UO_2 dengan variasi jumlah CFP

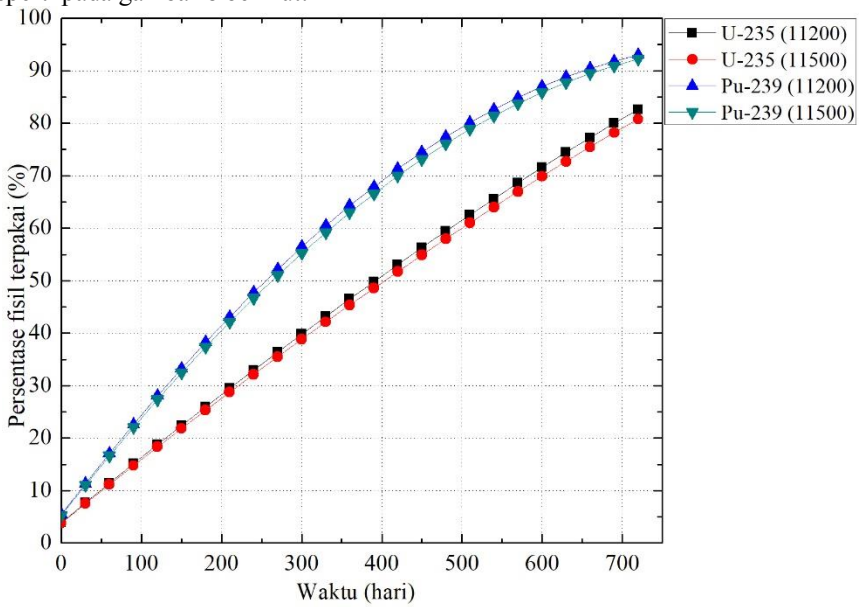


Gambar 7. Nilai k-inf untuk HTGR 50 MWt berbahan bakar $(U\text{-}Pu)O_2$ dengan variasi jumlah CFP

Gambar 6 dan 7 menunjukkan nilai k-inf berturut-turut untuk bahan bakar UO_2 dan $(U\text{-}Pu)O_2$ dengan variasi jumlah CFP yang berbeda. Dari kedua grafik tersebut didapatkan bahwa untuk jumlah CFP 4500 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. Sedangkan jumlah CFP dari kedua bahan bakar yang memenuhi target operasi adalah yang bernilai lebih besar dari 8950, yaitu 11200, 11500, 13000, 17900, 22380, dan 26850. Namun jumlah CFP yang semakin banyak justru pembakaran material fisil kurang efektif. Sehingga dari grafik persentase bahan bakar fisil yang terpakai yang terdapat pada 4 dan 5 serta dari grafik k-inf dengan variasi jumlah CFP yang terdapat pada 6 dan 7 terlihat bahwa jumlah CFP yang memenuhi target dua tahun dan menunjukkan pembakaran material fisil paling efektif adalah CFP yang berjumlah 11500.

Persentase material fisil pada bahan bakar UO_2 yang terpakai di akhir periode operasi sebesar 80,79%, dan pada $(U\text{-}Pu)O_2$ sebesar 92,25%. Dari kedua bahan bakar tersebut, pembakaran material fisil yang paling efektif, yang berarti persentase bahan bakar fisil yang terpakai di akhir periode operasi paling besar adalah

pada bahan bakar (U-Pu)O_2. Perbandingan persentase material fisil yang habis terpakai untuk kedua bahan bakar adalah seperti pada gambar 8 berikut:



Gambar 8. Persentase bahan bakar fisil yang habis terpakai untuk kedua jenis bahan bakar dengan jumlah CFP 11200 dan 11500

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan optimasi parameter neutronik pada level *assembly* untuk mendapatkan bahan bakar dengan pembakaran material fisil yang paling efektif pada desain HTGR prismatik dengan daya 50 MWt menggunakan bahan bakar UO_2 dan (U-Pu)O_2. Desain HTGR yang digunakan diadopsi dari desain HTTR-30 Jepang dengan melakukan peningkatan daya dari 30 MWt menjadi 50 MWt dan target operasi selama dua tahun. Hasil analisa yang dilakukan menunjukkan bahwa nilai *enrichment* yang optimal untuk HTGR prismatik 50 MWt dengan bahan bakar UO_2 dan (U-Pu)O_2 adalah 10% dan jumlah CFP yang optimal adalah 11500 buah. Dari kedua bahan bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini didapatkan bahwa pembakaran material fisil paling efektif pada HTGR prismatik 50 MWt adalah pada bahan bakar (U-Pu)O_2 dengan persentase material fisil yang habis terpakai pada akhir periode operasi sebesar 92,25%.

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 2018.

REFERENSI

1. Badan Tenaga Nuklir Nasional. *Reaktor Daya Eksperimental*.
2. http://www.batan.go.id/index.php/id/reaktor-daya-eksperimental-rde (Diakses 20 Mei 2018)
3. K. Okumura, T. Kugo, K. Kaneko, and K. Tsuchihashi. *SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. JAEA-Data/Code 2007-004 (2007)
4. K. Shibata et al.,*JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineerin*. J. Nucl. Sci. Technol., **48**, 1-30 (2011).
5. 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)