

Analisis neutronik nigh temperature reactor (HTR) dengan bahan bakar $\text{UO}_2\text{-ThO}_2$ tipe prismatic berpendingin ${}^7\text{LiF-BeF}_2$

Mardiono Abdi, Sihana, dan Alexander Agung

Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika FT UGM
Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281

E-mail: mardionoabdi@gmail.com

Abstrak. *High Temperature Reactor* (HTR) merupakan reaktor yang dapat beroperasi dengan suhu yang tinggi sehingga dapat mendukung aplikasi panas proses industri lain. Konsep reaktor ini menghasilkan energi yang berkelanjutan, menawarkan peningkatan resistensi proliferasi nuklir, menjanjikan operasi dengan burnup yang tinggi, dan potensi kegagalan bahan bakar yang rendah dengan retensi produk fisi yang sangat baik melalui desain bahan bakar partikel *Tristructural-isotropic* (TRISO). Penelitian ini bertujuan menentukan pengayaan UO_2 yang paling minimal dan *Packing Fraction* (PF) TRISO di dalam elemen bahan bakar agar reaktor kritis sehingga diharapkan dapat melakukan pembiakan (*Breeding*) dan menentukan pengayaan UO_2 agar teras reaktor dapat beroperasi selama 2 tahun dengan rasio konversi bahan bakar (CR) yang paling besar. Faktor-faktor yang dicari adalah CR, koefisien reaktivitas umpan balik suhu dan *void* pendingin, dan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Penelitian yang dilakukan untuk perhitungan kekritisan dan parameter neutronik lainnya menggunakan program SCALE 6.1. Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan maka kesimpulan yang dapat diambil yaitu agar reaktor kritis diperlukan pengayaan ${}^{235}\text{U}$ minimal sebesar 7% dan nilai PF=0,6046 yang menghasilkan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff})=1,00670±0,00028 dengan nilai CR=0,8427. Desain HTR tipe prismatic yang telah dilakukan memiliki aspek keselamatan melekat yang baik yaitu memiliki koefisien reaktivitas suhu bahan bakar (α_T) sebesar $-7,437 \times 10^{-5}/\text{K}$, koefisien reaktivitas suhu pendingin (α_c) sebesar $-5,6417 \times 10^{-6}/\text{K}$, dan koefisien reaktivitas *void* pendingin $\alpha_\phi = -0,0105/\%void$. Untuk waktu pengoperasian reaktor selama 732 hari, desain HTR tipe prismatic memerlukan pengayaan ${}^{235}\text{U}$ yang masih tergolong *low enrichment* menurut peraturan IAEA yaitu sebesar 17% dan PF=0,6046 dengan nilai CR=0,49 saat MOL dan CR=0,5 saat EOL serta memiliki nilai *burnup* bahan bakar sebesar 2.817 MWd/tHM.

1. Pendahuluan

Energi nuklir merupakan alternatif lain dalam pemenuhan kebutuhan energi listrik. Penggunaan energi nuklir menjanjikan energi listrik yang masif melalui reaktor nuklir. Penggunaan energi nuklir juga tidak menghasilkan emisi gas CO_2 yang mengakibatkan efek rumah kaca. Sehingga dapat dikatakan energi nuklir merupakan energi yang bersih dan ramah lingkungan. Batasan-batasan yang dimiliki oleh penggunaan energi terbarukan juga tidak dimiliki oleh energi nuklir. Sehingga penggunaan energi nuklir dapat diaplikasikan pada semua tempat dan dapat menghasilkan energi listrik yang

berkelanjutan. Berbagai kelebihan yang ditawarkan dari penggunaan energi nuklir membuat pengembangan reaktor nuklir masih terus dilakukan hingga saat ini.

Pengembangan reaktor nuklir dimulai dari generasi I, II, III, III+ dan saat ini sudah sampai pada generasi IV. Pengembangan reaktor nuklir dilakukan untuk meningkatkan aspek ekonomi, keselamatan, keamanan, safeguard, dan efisiensi. Terdapat enam konsep reaktor generasi IV yaitu *Very High Temperature Reactor* (VHTR), *Sodium Fast Reactor* (SFR), *Super-Critical Water cooled Reactor* (SCWR), *Gas cooled Fast Reactor* (GFR), *Lead cooled Fast Reactor* (LFR), dan *Molten Salt Reactor* (MSR). Reaktor nuklir generasi IV disebut reaktor nuklir generasi maju. Konsep reaktor ini menghasilkan energi yang berkelanjutan, menawarkan peningkatan resistensi proliferasi nuklir, menjanjikan operasi dengan burnup yang tinggi, dan potensi kegagalan bahan bakar yang rendah dengan retensi produk fisi yang sangat baik melalui desain bahan bakar partikel *Tristructural-isotropic* (TRISO). Kemudian, temperatur operasi reaktor yang sangat tinggi juga membuat konsep reaktor ini dapat mendukung aplikasi panas proses industri lain.

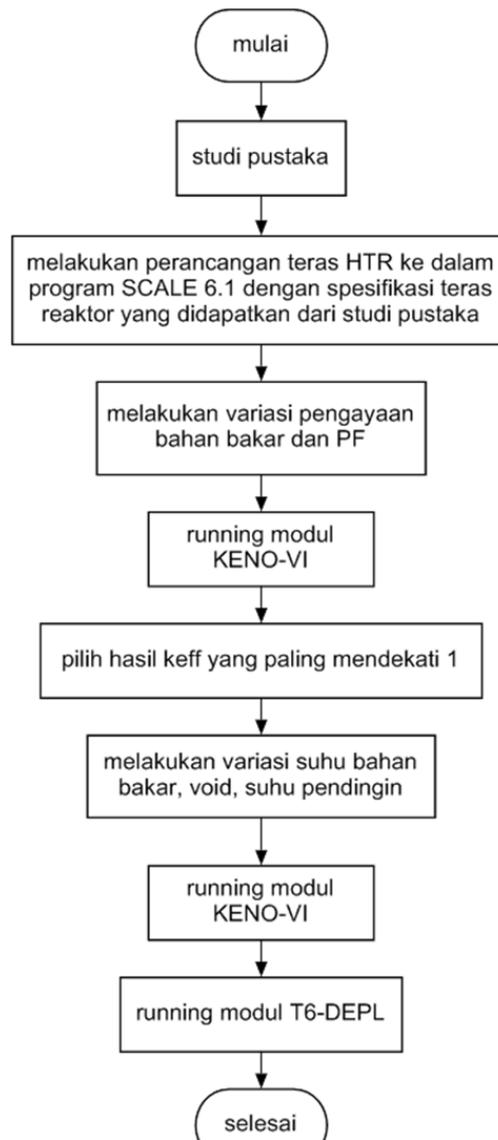
Very High Temperature Reactor (VHTR) merupakan salah satu dari konsep reaktor generasi IV. VHTR merupakan pengembangan dari reaktor HTR yang menggunakan gas helium sebagai pendinginnya. Penelitian ini bertujuan mengganti pendingin gas helium menjadi berpendingin garam cair berupa ${}^7\text{LiF-BeF}_2$ yang biasa disebut FLiBe. Penggunaan pendingin gas helium membutuhkan tekanan operasi reaktor yang tinggi. Penggunaan tekanan operasi yang tinggi akan berbahaya jika terjadi kebocoran pada pipa pendingin reaktor. Pendingin reaktor yaitu gas helium bertekanan tinggi akan keluar dengan sangat cepat ke lingkungan. Sementara penggunaan pendingin garam cair FLiBe dapat membuat tekanan operasi reaktor menjadi bertekanan atmosfer karena titik didih FLiBe yang tinggi yaitu $T > 1400\text{ }^\circ\text{C}$ pada tekanan atmosfer sehingga dengan suhu operasi reaktor yang dibawah itu tidak sampai membuat pendingin menguap.

Selain itu perlu juga dikembangkan konsep pembiakan (Breeding) agar bahan tidak dapat belah (fertile) dapat dimanfaatkan dengan cara dibiakkan dan menjadi bahan dapat belah (fissile). Oleh karena itu dilakukan penggantian jenis bahan bakar yang semula hanya menggunakan Uranium Karbida (UC) atau Uranium Dioksida (UO_2) menjadi berbahan bakar Uranium Dioksida dan Thorium Dioksida ($\text{UO}_2\text{-ThO}_2$). Penggantian jenis bahan bakar menjadi $\text{UO}_2\text{-ThO}_2$ akan dilakukan dalam penelitian ini sehingga teras reaktor nuklir diharapkan dapat melakukan pembiakan. Konsep pembiakan dapat membuat siklus bahan bakar reaktor nuklir menjadi lebih lama dikarenakan adanya bahan fertile yang berubah menjadi bahan fisile yang dapat bereaksi fisi.

Penelitian ini bertujuan menentukan pengayaan UO_2 yang paling minimal dan Packing Fraction (PF) TRISO di dalam elemen bahan bakar agar reaktor kritis dan diharapkan dapat melakukan pembiakan (Breeding) dan menentukan pengayaan UO_2 agar teras reaktor dapat beroperasi selama 2 tahun dengan CR yang paling besar. Dalam hal ini, faktor-faktor yang dicari adalah rasio konversi bahan bakar (CR), koefisien reaktivitas umpan balik suhu dan void pendingin, faktor multiplikasi efektif (keff).

2. Teori yang Digunakan

Tata laksana penelitian secara umum yang dilakukan ditunjukkan seperti pada diagram alir sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram alir tata laksana penelitian

Penelitian ini diawali dengan mengumpulkan referensi dan data-data penting yang digunakan untuk menunjang penelitian seperti spesifikasi reaktor dan hasil penelitian-penelitian sebelumnya yang terkait. Referensi dapat diambil dari berbagai literatur *online* dan *offline* yang tersedia seperti dari jurnal nasional dan internasional, buku-buku kuliah, materi-materi kuliah, dan skripsi yang telah dilakukan sebelumnya.

Langkah selanjutnya yaitu melakukan pemodelan geometri teras HTR tipe prismaik. Pembuatan input untuk program SCALE 6.1 dilakukan menggunakan aplikasi GeeWiz yang merupakan aplikasi yang telah terintegrasi dengan SCALE 6.1. Langkah ini juga melakukan homogenisasi bahan bakar TRISO dengan menggunakan *Doublehet Cell* pada program SCALE 6.1.

Setelah melakukan pemodelan teras HTR pada SCALE 6.1, dilakukan variasi pengayaan nuklida ${}^{235}\text{U}$ di dalam bahan bakar UO_2 dan *Packing Factor* (PF). Variasi pengayaan nuklida ${}^{235}\text{U}$ di dalam bahan bakar UO_2 yang digunakan yaitu 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, dan 10%. Variasi PF dilakukan untuk seluruh variasi pengayaan bahan bakar mulai dari pengayaan 5% hingga 10% adalah sebagai berikut:

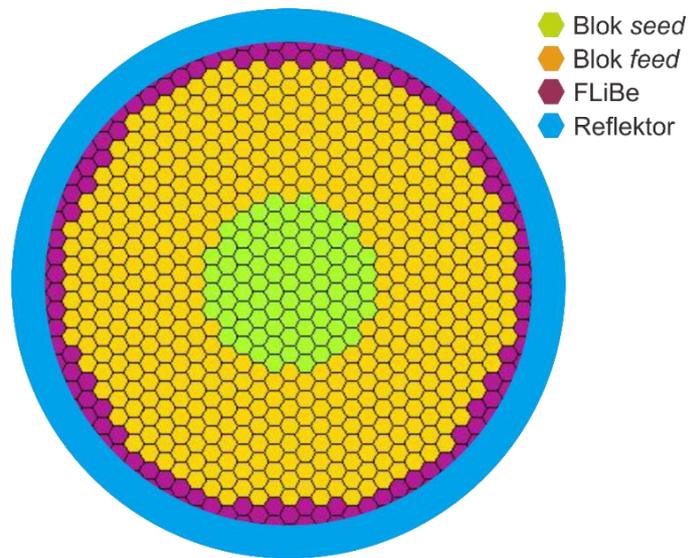
Tabel 1. Variasi nilai PF

Jari-jari TRISO (cm)	Jari-jari <i>lattice</i> heksaprisma (cm)	Nilai PF
0,05	0,05	0,6046
0,05	0,07	0,2203
0,05	0,09	0,1037
0,05	0,11	0,0568
0,05	0,13	0,0344
0,05	0,15	0,0224
0,05	0,17	0,0154
0,05	0,19	0,0110

Penelitian selanjutnya yaitu melakukan perubahan suhu bahan bakar mulai dari 1000 K hingga 1250 K dengan kenaikan perubahan suhu bahan bakar sebesar 25 K, melakukan variasi *void* pendingin sebesar 0% hingga 8% dengan kenaikan perubahan sebesar 2%, dan melakukan perubahan suhu pendingin mulai dari 900 K hingga 1000 K dengan peningkatan perubahan suhu pendingin sebesar 25 K. Perubahan ketiga variasi yang mempengaruhi aspek keselamatan tersebut terhadap salah satu variasi pengayaan bahan bakar dan variasi nilai PF yang menghasilkan nilai faktor multiplikasi paling mendekati 1.

Setelah dilakukan simulasi pada modul KENO-VI dan T6-DEPL, didapatkan hasil *running* untuk tiap modul. Hasil simulasi dengan modul KENO-VI diperoleh nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), laju reaksi serapan neutron material fisil ^{235}U , dan laju tengkapan neutron untuk material fertil ^{238}U dan ^{232}Th . Data-data yang diperoleh tersebut dimasukkan ke dalam lembar kerja Microsoft Excel 2013 dan dikelompokkan berdasarkan tingkat pengayaan dan PF. Dari data laju reaksi serapan neutron material fisil ^{235}U , dan laju tengkapan neutron untuk material fertil ^{238}U dan ^{232}Th dimasukkan ke dalam persamaan CR sehingga diperoleh nilai CR untuk tiap pengayaan dan PF. Kemudian berdasarkan pengelompokkan tersebut dibuat grafik k_{eff} terhadap PF untuk tiap pengayaan bahan bakar ^{235}U dan grafik CR terhadap PF untuk tiap pengayaan bahan bakar ^{235}U . Berdasarkan grafik yang diperoleh, kemudian dipilih variasi desain yang mempunyai nilai k_{eff} mendekati 1 dan nilai CR yang lebih dari 1. Hal ini berarti dipilih desain teras reaktor agar mencapai kondisi yang kritis dengan variasi pengayaan dan PF tertentu. Kemudian variasi desain agar reaktor mencapai kondisi kritis tersebut dapat kita sebut sebagai PF dan pengayaan ^{235}U minimal dari HTR tipe prismatic agar reaktor mencapai kondisi kritis. Selanjutnya menganalisis aspek keselamatan melekat dari HTR tipe prismatic tersebut. Parameter yang dianalisis yaitu koefisien reaktivitas suhu bahan bakar, koefisien reaktivitas suhu pendingin, dan koefisien reaktivitas *void* pendingin. Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar dan koefisien reaktivitas suhu pendingin diharapkan bernilai negatif saat suhu meningkat, sementara koefisien reaktivitas *void* bernilai negatif saat timbul *void*. Jika ketiga hal tersebut tercapai maka desain HTR tipe prismatic yang telah dibuat memiliki sifat keselamatan melekat yang baik. Sedangkan jika salah satu ataupun keduanya bernilai positif maka desain HTR tipe prismatic yang telah dibuat memiliki sifat keselamatan melekat yang kurang baik.

Berdasarkan hasil simulasi dengan modul T6-DEPL didapatkan data k_{eff} untuk periode waktu operasi reaktor selama 2 tahun. Dari data tersebut dikelompokkan berdasarkan variasi pengayaan bahan bakar. Kemudian dibentuk grafik k_{eff} vs waktu operasi reaktor. Berdasarkan grafik yang diperoleh dapat diketahui panjang waktu operasi reaktor yang dapat dicapai yaitu dari nilai k_{eff} yang tepat dibawah 1. Variasi susunan blok bahan bakar fertil dan fisil di dalam teras reaktor seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Variasi susunan blok bahan bakar fertil dan fisil di teras reaktor

Spesifikasi HTR tipe prismatic yang digunakan yaitu sebagai berikut:

Tabel 2. Spesifikasi TRISO

Material	Densitas (g/cm^3)	Diameter luar (mm)
UO_2	10,7	0,6
ThO_2	9,8	0,6
<i>Porous Carbon</i>	1,1	0,77
IPyC	1,9	0,85
SiC	3,2	0,92
OPyC	1,9	1,00

Tabel 3. Karakteristik desain teras HTR

Daya Termal (MWt)	600
Suhu Operasi Reaktor (K)	1000
Tinggi Teras (cm)	600
Diameter Teras (cm)	1200
Diameter <i>Compact Fuel</i> (cm)	3,8
Jari-jari <i>Fuel Block</i> Prisma (cm)	20
Jumlah <i>Compact Fuel</i> per <i>Fuel Block</i>	60
Jumlah <i>Fuel Block</i> dalam Teras	571
Diameter <i>Seed</i> (cm)	400
Tinggi <i>Seed</i> (cm)	200
Diameter <i>Feed</i> (cm)	1000
Tinggi <i>Feed</i> Atas dan Bawah (cm)	80
Tebal Reflektor Samping (cm)	175
Tebal Reflektor Atas dan Bawah (cm)	120
Material Reflektor	ZrC
Densitas Material Reflektor (g/cm^3)	6,6
Material Moderator	Grafit
Densitas Material Moderator (g/cm^3)	2,3

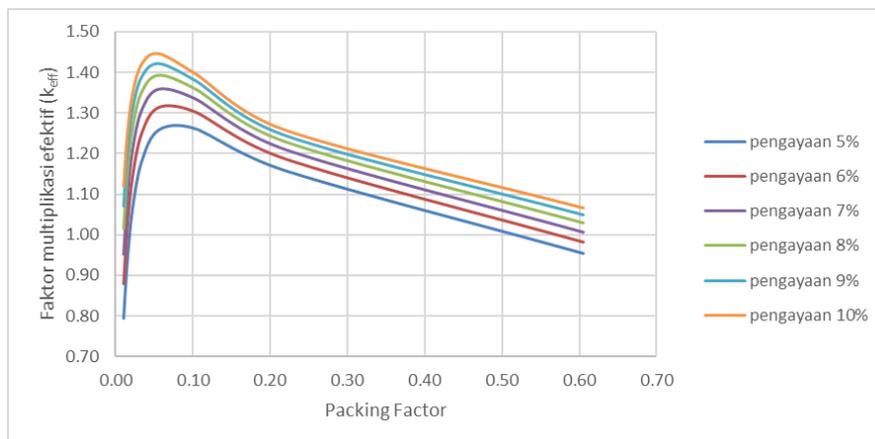
Material Pendingin	${}^7\text{LiF-BeF}_2$
Densitas Material Pendingin (g/cm^3)	1,925
Diameter <i>Coolant Hole</i> pada <i>Compact Fuel</i> (cm)	1
Diameter <i>Coolant Hole</i> pada <i>Fuel Block</i> (cm)	3,8
Tebal <i>Cladding</i> (mm)	0,5
Material <i>Cladding</i>	ZrC
Densitas Material <i>Cladding</i> (g/cm^3)	6,6

3. Metode Penelitian/Eksperimen

3.1. Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff}) dan Conversion Ratio (CR)

Perancangan yang telah dilakukan di simulasikan menggunakan program SCALE 6.1 dengan modul KENO-VI. Hasil simulasi diperoleh data faktor multiplikasi efektif untuk setiap variasi pengayaan bahan bakar dan variasi PF. Diperoleh data sebanyak 48 data yang merupakan variasi pengayaan bahan bakar mulai dari 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, dan 10% yang masing-masing variasi pengayaan bahan bakar kemudian dilakukan variasi PF yang ditampilkan dalam Tabel 1. Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan Ms. Excel 2013 dan ditampilkan dalam bentuk grafik.

Grafik ditampilkan dengan nilai absis yang merupakan sumbu-x yaitu PF dan nilai ordinat yang merupakan sumbu-y yaitu faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) seperti pada Gambar 3. Faktor multiplikasi efektif merupakan parameter yang digunakan dalam pengoperasian reaktor. Faktor multiplikasi efektif dengan nilai $k_{eff} > 1$ disebut dengan reaktor dalam kondisi superkritis. Kondisi reaktor superkritis menunjukkan jumlah neutron akan lebih banyak pada generasi neutron berikutnya tanpa adanya sumber neutron eksternal. Kondisi superkritis mengakibatkan reaksi fisi yang terjadi akan meningkat sehingga daya reaktor yang dihasilkan juga akan meningkat. Sebaliknya faktor multiplikasi efektif dengan nilai $k_{eff} < 1$ disebut dengan reaktor dalam kondisi subkritis. Kondisi reaktor subkritis menunjukkan jumlah neutron akan berkurang pada generasi neutron berikutnya tanpa adanya sumber neutron eksternal. Kondisi subkritis mengakibatkan reaksi fisi yang terjadi di reaktor berkurang sehingga daya reaktor yang dihasilkan juga akan berkurang. Faktor multiplikasi dengan nilai $k_{eff} = 1$ disebut dengan reaktor dalam kondisi kritis. Kondisi reaktor kritis menunjukkan jumlah neutron yang dibangkitkan sama dengan jumlah neutron generasi sebelumnya tanpa adanya sumber neutron eksternal. Kondisi kritis mengakibatkan reaksi fisi yang terjadi di reaktor menjadi stabil sehingga daya reaktor yang dihasilkan juga akan stabil.



Gambar 3. Grafik k_{eff} terhadap PF

Absis pada grafik merupakan variasi nilai PF. Nilai yang semakin kecil menunjukkan jarak antar TRISO yang berada di dalam compact bahan bakar semakin renggang yang berarti jumlah TRISO di dalam compact bahan bakar semakin sedikit. Sebaliknya nilai PF yang semakin besar menunjukkan

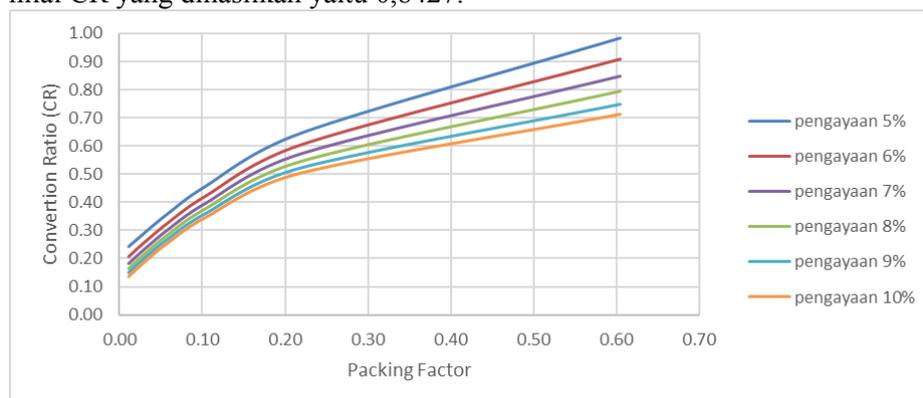
jarak antar TRISO sangat rapat yang berarti jumlah TRISO menjadi sangat banyak. Penelitian yang dilakukan menggunakan lattice TRISO heksagonal sehingga nilai maksimal PF yaitu 0,6046.

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh dan ditampilkan dalam bentuk grafik, dapat dilihat bahwa semakin kecil nilai PF maka nilai k_{eff} akan semakin mengecil menuju kondisi subkritis. Kemudian terjadi pemuncakan hingga kondisi reaktor superkritis seiring nilai PF semakin membesar dan akan kembali mengalami penurunan nilai k_{eff} menuju kondisi subkritis. Hal ini dipengaruhi oleh banyaknya bahan bakar TRISO di dalam *compact* bahan bakar. Jumlah TRISO yang banyak akan mengurangi jumlah moderator di dalam *compact* bahan bakar sehingga nilai rasio moderator terhadap bahan bakar (N^m/N^u) akan kecil. Reaktor yang berada pada kondisi ini disebut *undermoderated*. Sebaliknya jumlah TRISO yang sedikit akan menambah jumlah moderator di dalam *compact* bahan bakar sehingga nilai N^m/N^u akan besar. Reaktor yang berada pada kondisi ini disebut *overmoderated*.

Hasil penelitian menunjukkan nilai k_{eff} puncak berada pada nilai PF 0,0568 dengan jari-jari *lattice* heksagonal 0,11 cm. Grafik hasil penelitian menunjukkan daerah *undermoderated* yaitu dengan nilai $0,6046 > \text{PF} > 0,0568$ lebih lebar daripada daerah *overmoderated* yaitu dengan nilai $0,0568 > \text{PF} > 0,0110$. Kemudian, kenaikan pengayaan ${}^{235}\text{U}$ di dalam bahan bakar akan menyebabkan kenaikan grafik k_{eff} . Grafik dengan pengayaan ${}^{235}\text{U}$ yang lebih tinggi akan berada di atas grafik yang pengayaannya lebih rendah. Hal ini disebabkan karena banyaknya material fisil di dalam bahan bakar sehingga reaksi fisi dengan pengayaan ${}^{235}\text{U}$ lebih tinggi akan lebih banyak.

Parameter operasi desain reaktor HTR tipe prismatic dengan bahan bakar $\text{UO}_2\text{-ThO}_2$ yang kedua yaitu *Conversion Ratio* (CR). Suatu reaktor nuklir yang memiliki nilai $\text{CR} > 1$ dapat dikatakan memiliki kemampuan pembiakan (*breeding*). Nilai $\text{CR} > 1$ menunjukkan bahwa laju tangkapan neutron oleh bahan fertil untuk menjadi bahan fisil lebih besar daripada laju serapan neutron oleh bahan fisil. Hal ini akan menghasilkan banyaknya bahan fisil yang terbentuk akibat reaksi tangkapan oleh bahan fertil sehingga akan memperpanjang umur teras reaktor. Hasil penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 4 bahwa nilai CR yang dihasilkan seluruhnya lebih kecil dari 1. Nilai $\text{CR} < 1$ menunjukkan bahwa laju tangkapan neutron oleh bahan fertil untuk menjadi bahan fisil lebih rendah daripada laju serapan neutron oleh bahan fisil. Hal ini berarti reaktor nuklir belum mempunyai kemampuan pembiakan.

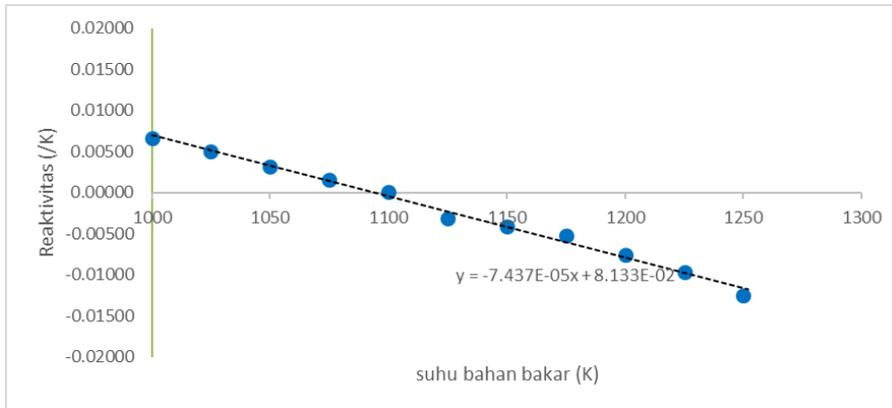
Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, nilai faktor multiplikasi efektif yang paling kritis yaitu dengan nilai $k_{\text{eff}} = 1,00670 \pm 0,00028$. Variasi pengayaan bahan bakar ${}^{235}\text{U}$ dan PF yang menghasilkan nilai $k_{\text{eff}} = 1,00670 \pm 0,00028$ yaitu pengayaan ${}^{235}\text{U}$ sebesar 7% dan $\text{PF} = 0,6046$ dengan nilai CR yang dihasilkan yaitu 0,8427.



Gambar 4. Grafik pengaruh PF terhadap CR

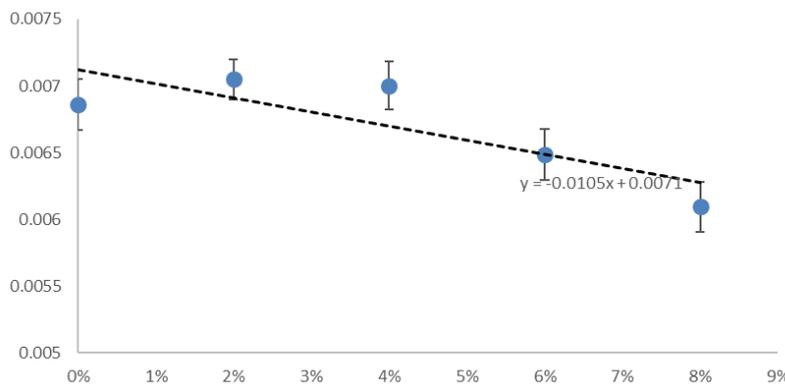
3.2. Koefisien Reaktivitas Suhu dan Void

Selanjutnya dilakukan analisis aspek keselamatan yaitu dengan mengetahui nilai koefisien reaktivitas suhu bahan bakar (α_T), koefisien reaktivitas *void* pendingin (α_ϕ), dan koefisien reaktivitas suhu pendingin (α_c). Untuk menganalisis aspek keselamatan teras reaktor dipilih salah satu variasi desain teras reaktor yang telah dilakukan sebelumnya. Variasi pengayaan ${}^{235}\text{U}$ sebesar 7% dan $\text{PF} = 0,6046$ merupakan variasi yang dipilih dikarenakan menghasilkan nilai k_{eff} paling mendekati kritis yaitu $k_{\text{eff}} = 1,00670 \pm 0,00028$.



Gambar 5. Grafik pengaruh suhu bahan bakar terhadap nilai reaktivitas

Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai reaktivitas semakin menurun. Hal ini menandakan bahwa jika suhu bahan bakar mengalami kenaikan, teras reaktor memiliki α_T yang bernilai negatif. Nilai α_T dapat didekati dari nilai gradien dari grafik. Nilai gradien dari grafik didapatkan dengan melakukan regresi linier terhadap grafik. Sehingga didapatkan nilai α_T yaitu gradien dari persamaan regresi linier. Hasil penelitian diperoleh nilai $\alpha_T = -7,437 \times 10^{-5}/K$. Selanjutnya melakukan analisis aspek keselamatan untuk parameter yang kedua yaitu koefisien reaktivitas void pendingin (α_ϕ). Pendingin yang digunakan yaitu garam cair FLiBe yang memiliki titik didih tinggi yaitu diatas $1400^\circ C$. Void yang timbul di dalam pendingin diasumsikan bukan berasal dari penguapan pendingin dikarenakan pendingin FLiBe memiliki titik didih yang sangat tinggi, sementara suhu operasi reaktor dibawah titik didih pendingin yaitu $727^\circ C$. Void yang timbul di dalam pendingin diasumsikan berasal dari udara masuk pipa pendingin karena terjadi sedikit kebocoran pada pipa pendingin maupun kontak dengan instrumen lain selain teras reaktor. Hasil penelitian yang diperoleh ditampilkan dibentuk grafik pada Gambar 6.



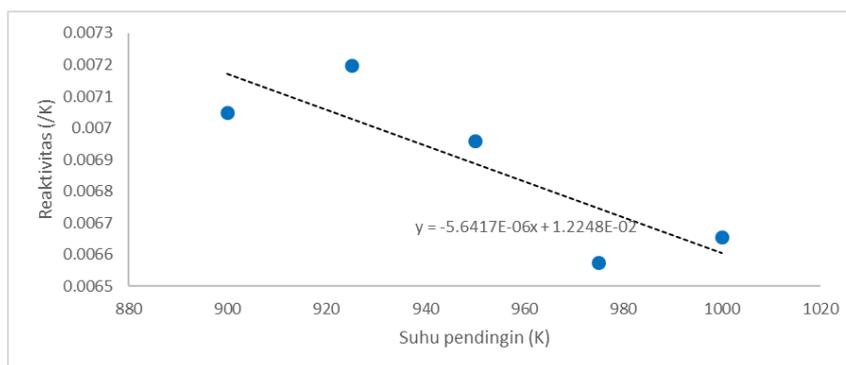
Gambar 6. Grafik pengaruh void terhadap nilai reaktivitas

Berdasarkan hasil penelitian diketahui bahwa semakin banyak void yang timbul di dalam pendingin mengakibatkan nilai reaktivitas menurun. Meskipun nilai reaktivitas menunjukkan tren yang menurun, akan tetapi pada void 0% hingga 4% terdapat sedikit kenaikan nilai reaktivitas yang menandakan terdapat nilai koefisien reaktivitas positif. Setelah itu penambahan void hingga 8% mengakibatkan nilai reaktivitas semakin menurun. Jumlah void sebesar 4% merupakan jumlah yang sedikit dan biasanya terjadi terjadi dalam waktu yang singkat. Sehingga kenaikan nilai reaktivitas pada kondisi tersebut tidak terlalu signifikan. Akan tetapi nilai void $>4\%$ menunjukkan tren nilai reaktivitas yang menurun. Hal ini diakibatkan jumlah void yang sudah cukup banyak dan telah membuat nilai densitas pendingin berkurang cukup banyak.

Void yang terdapat di dalam pendingin mengakibatkan densitas pendingin menjadi berkurang. Hal ini mengakibatkan kemampuan pendingin dalam memoderasi neutron menjadi berkurang. Penelitian yang dilakukan menggunakan desain teras reaktor dengan grafit sebagai moderatornya, akan tetapi pendingin mempunyai peran dalam melakukan perlambatan neutron meskipun peranan pendingin dalam memoderasi neutron cepat menjadi neutron termal tidak cukup signifikan. Desain teras reaktor yang digunakan berada pada kondisi undermoderated sehingga jika densitas pendingin berkurang maka nilai k_{eff} akan turun yang menandakan reaktor memiliki koefisien reaktivitas yang negatif. Akan tetapi pengurangan nilai k_{eff} tidak cukup signifikan dikarenakan peran pendingin hanya sebagai transfer panas dan bukan sekaligus sebagai moderator seperti pada reaktor LWR.

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, koefisien reaktivitas berubah pada awal-awal terbentuknya void. Akan tetapi grafik hasil penelitian seperti yang ditampilkan pada Gambar 6, tren grafik menunjukkan penurunan nilai reaktivitas. Pendekatan untuk mendapatkan nilai koefisien reaktivitas void dapat dilakukan dengan persamaan regresi linier terhadap grafik reaktivitas terhadap void. Koefisien reaktivitas void yang diperoleh yaitu sebesar $\alpha_{\phi} = -0,0105/\%void$

Parameter aspek keselamatan yang ketiga yaitu koefisien reaktivitas suhu pendingin (α_c). Hasil perhitungan nilai k_{eff} dan reaktivitas terhadap suhu pendingin ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 7.



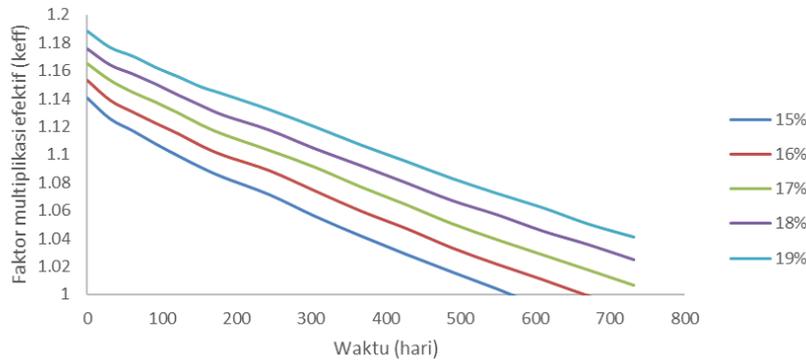
Gambar 7. Grafik pengaruh suhu pendingin terhadap nilai reaktivitas

Meningkatnya suhu pendingin mengakibatkan terjadinya ekspansi pada pendingin sehingga densitas pendingin menjadi lebih kecil. Hal ini akan mempengaruhi kemampuan pendingin dalam memoderasi neutron walaupun peran pendingin bukan sebagai moderator. Perubahan densitas pendingin menjadi lebih kecil akan mengakibatkan nilai reaktivitas mengecil. Akan tetapi dikarenakan peranan pendingin tidak cukup signifikan dalam memoderasi neutron, penurunan nilai reaktivitas tidak cukup signifikan.

Grafik yang dihasilkan menunjukkan tren nilai reaktivitas yang menurun. Perubahan nilai reaktivitas terhadap suhu pendingin dapat didekati dengan persamaan regresi linier. Persamaan regresi linier nilai reaktivitas yang diperoleh yaitu $\rho = -5,6417 \times 10^{-6}x + 1,2248 \times 10^{-2}$. Nilai koefisien reaktivitas suhu pendingin dapat diperoleh dari gradien persamaan regresi linier yaitu $\alpha_c = -5,6417 \times 10^{-6}/K$. Berdasarkan hasil yang diperoleh terhadap ketiga parameter di atas, dapat disimpulkan bahwa desain teras reaktor memiliki aspek keselamatan yang melekat (*inherent safety*).

3.3. *Burnup Bahan Bakar*

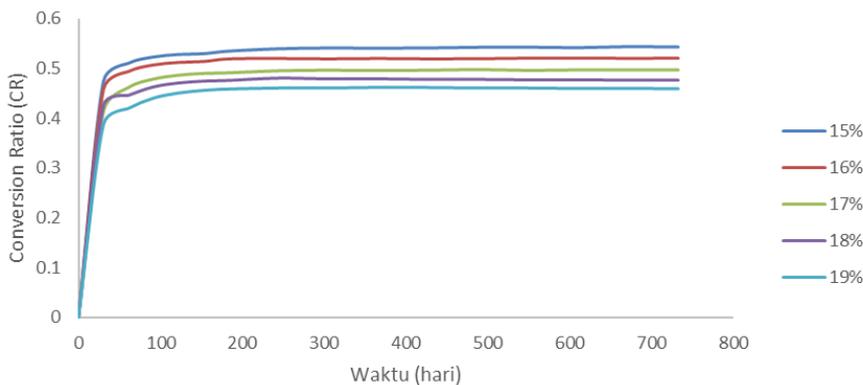
Setelah diperoleh nilai PF dan nilai pengayaan ${}^{235}\text{U}$ minimal agar reaktor telah dalam kondisi kritis, kemudian dilakukan variasi pengayaan ${}^{235}\text{U}$ agar reaktor mampu beroperasi selama 732 hari. Batas maksimal variasi pengayaan ${}^{235}\text{U}$ ditentukan berdasarkan batas maksimal pengayaan ${}^{235}\text{U}$ yang diperbolehkan oleh International Atomic Energy Agency (IAEA) yaitu dibawah 20%. Hasil penelitian diperoleh grafik k_{eff} terhadap waktu operasi reaktor seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik nilai k_{eff} terhadap waktu

Grafik pada Gambar 8 merupakan hubungan nilai k_{eff} terhadap waktu operasi reaktor dimulai dari Beginning of Life (BOL) hingga End of Life (EOL) selama 732 hari untuk variasi pengayaan ^{235}U di dalam bahan bakar sebesar 15% hingga 19%. Nilai k_{eff} akan tinggi saat BOL dikarenakan bahan bakar masih dalam kondisi baru. Nilai k_{eff} yang tinggi menunjukkan kondisi reaktor superkritis. Dalam pengoperasian reaktor nuklir saat BOL dirancang agar superkritis. Akan tetapi kelebihan reaktivitas saat BOL akan dikompensasi oleh batang kendali yang terdapat di dalam teras reaktor. Sehingga dalam kondisi nyata saat BOL pengoperasian teras reaktor tetap dalam kondisi kritis.

Saat Middle of Life (MOL) nilai k_{eff} akan menurun. Hal ini dikarenakan jumlah ^{235}U yang berada di dalam teras reaktor telah berkurang akibat dikonsumsi untuk melakukan reaksi fisi. Saat EOL nilai k_{eff} telah berada dibawah 1 atau dengan kata lain reaktor telah berada dalam kondisi subkritis. Saat EOL jumlah ^{235}U yang terdapat di teras reaktor tidak cukup untuk membuat reaksi fisi tetap berkelanjutan. Hal ini dikarenakan ^{235}U telah habis dikonsumsi pada awal-awal pengoperasian reaktor. Panjang waktu dari BOL hingga EOL merupakan waktu operasi reaktor. Kemudian hasil penelitian juga mendapatkan nilai CR untuk setiap step waktu selama 732 hari. Nilai CR untuk setiap pengayaan bahan bakar terhadap waktu ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik nilai CR terhadap waktu

Hasil penelitian diketahui semakin tinggi pengayaan bahan bakar maka nilai CR pada MOL dan EOL akan semakin kecil. Berdasarkan dua buah grafik hasil penelitian yang diperoleh, diketahui bahwa semakin besar pengayaan ^{235}U di dalam bahan bakar maka waktu operasi reaktor akan semakin lama. Hal ini dapat dilihat dari nilai k_{eff} yang telah berada di bawah 1. Nilai k_{eff} telah berada di bawah 1 menunjukkan reaktor telah berada pada kondisi subkritis. Akan tetapi jika nilai pengayaan ^{235}U kecil maka nilai CR yang diperoleh kecil. Agar pengoperasian reaktor dapat berlangsung selama 732 hari dengan nilai CR yang paling besar, diperlukan pengayaan ^{235}U sebesar 17%. Pengayaan ^{235}U di bawah 17% akan memperpendek waktu operasi reaktor namun nilai CR akan besar. Pengayaan ^{235}U di atas 17% akan memperpanjang waktu operasi reaktor namun nilai CR akan kecil. Pengayaan ^{235}U di dalam

bahan bakar UO_2 sebesar 17% menghasilkan nilai $\text{CR}=0,49$ saat MOL dan $\text{CR}=0,5$ saat EOL serta memiliki nilai burnup bahan bakar sebesar 2.817 MWd/tHM.

4. Kesimpulan

Penelitian pada *High Temperature Reactor* (HTR) tipe prismaik menggunakan bahan bakar dengan kombinasi $\text{UO}_2\text{-ThO}_2$. *Seed* pada teras reaktor terletak pada tengah-tengah teras reaktor yang menggunakan bahan bakar material UO_2 . Sementara *blanket* terletak secara mengelilingi *seed* pada teras reaktor. HTR menggunakan pendingin garam cair FLiBe yang memiliki nilai konduktivitas termal yang cukup baik dan memiliki titik didih yang tinggi pada tekanan atmosfer yaitu $T > 1400^\circ\text{C}$ sehingga reaktor mampu beroperasi pada suhu tinggi dengan tekanan atmosfer. Desain teras reaktor HTR memiliki diameter *seed* sebesar 400 cm dan tinggi *seed* sebesar 200 cm. Kemudian desain HTR memiliki diameter *blanket* sebesar 1000 cm dan tinggi *blanket* sebesar 360 cm. Terdapat material reflektor yang mengelilingi *blanket* sehingga diameter teras keseluruhan yaitu 1200 cm dan tinggi teras 600 cm.

Berdasarkan penelitian dan analisis yang telah dilakukan maka kesimpulan yang dapat diambil yaitu agar reaktor kritis diperlukan pengayaan ${}^{235}\text{U}$ minimal sebesar 7% dan nilai $\text{PF}=0,6046$ yang menghasilkan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff})= $1,00670 \pm 0,00028$ dengan nilai $\text{CR}=0,8427$. Desain HTR tipe prismaik yang telah dilakukan memiliki aspek keselamatan melekat yang baik yaitu memiliki koefisien reaktivitas suhu bahan bakar (α_T) sebesar $-7,437 \times 10^{-5}/\text{K}$, koefisien reaktivitas suhu pendingin (α_c) sebesar $-5,6417 \times 10^{-6}/\text{K}$, dan koefisien reaktivitas *void* pendingin $\alpha_\phi = -0,0105/\% \text{void}$. Untuk waktu pengoperasian reaktor selama 732 hari, desain HTR tipe prismaik memerlukan pengayaan ${}^{235}\text{U}$ yang masih tergolong *low enrichment* menurut peraturan IAEA yaitu sebesar 17% dan $\text{PF}=0,6046$ dengan nilai $\text{CR}=0,49$ saat MOL dan $\text{CR}=0,5$ saat EOL serta memiliki nilai *burnup* bahan bakar sebesar 2.817 MWd/tHM.

5. Bibliografi

- [1] Fajar Arianto, Suwoto, dan Zuhair 2013 Studi Kritikalitas VHTR Prismaik Sebagai Fungsi Radius Bahan Bakar Kompak dan Kernel Jurnal Iptek Nuklir Ganendra 16 59-65
- [2] Jie Huang dan Ming Ding 2016 Neutronic Performance Comparison of Th-232 and U-238 as Blanket for Seed-and-Blanket Fuel Blocks in the AHTR The 5th International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER2016), Hefei, China
- [3] Guifeng Zhu, Yang Zou, Hongjie Xu, Ye Dai, Minghai Li, dan Rui Yan 2015 Uranium utilization with thorium blanket in Pebble Bed Fluoride salt-cooled high temperature reactor Progress in Nuclear Energy 83 374-386
- [4] David Samuel 2009 Molten Salt Coolants for High Temperature Reactors Literature Summary IAEA, IAEA Internship Report INPRO COOL
- [5] Christian Zulheri Siahaan 2016 Pengaruh Penggantian SiC dengan ZrC pada Lapisan Partikel TRISO Terhadap Faktor Multiplikasi pada Fluidized Bed Nuclear Reactor Skripsi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- [6] Irwan Lipato S 2010 Optimasi Komposisi Bahan Bakar Berbentuk Blok Prisma Segienam pada Desain High Temperature Fast Reactor (HTFR) Skripsi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- [7] Manohar S. Sohal, Matthias A. Ebner, Piyush Sabharwall, dan Phil Sharpe 2013 Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and Thermochemical Properties Idaho National Laboratory, Fremont Ave, Idaho Falls