

Pengaruh Ketinggian Larutan Bahan Bakar pada Kekritisian *Aqueous Homogeneous Reactor*

Cahyo Ridho Prabudi¹, Andang Widiharto², Sihana³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Fisika FT UGM

Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA

¹cahyo.hikaru@gmail.com

²andang@ugm.ac.id

³sihana@ugm.ac.id

Intisari— *Aqueous Homogeneous Reactor* (AHR) yang dikaji, termasuk jenis reaktor homogen karena bahan bakar dan moderatornya merupakan fase tunggal. Bahan bakar yang digunakan adalah $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ yang dilarutkan dalam air. Sedangkan untuk pendingin menggunakan H_2O , dengan grafit sebagai reflektor. Batasan masalah hanya terkait aspek kritikalitas pada kondisi *steady state*. Penelitian dilakukan dengan melakukan variasi ukuran diameter saluran pendingin untuk mendapatkan geometri optimal, serta konsentrasi uranil nitrat dalam bahan bakar dan ketinggian permukaan bahan bakar untuk mengatur kritikalitas reaktor saat beroperasi. Indikator optimal adalah nilai $k=\pm 1,1$ dan koefisien reaktivitas *void* negatif. Penelitian dilakukan dengan mensimulasikan 2 buah desain AHR menggunakan metode Monte Carlo, yaitu AHR dengan jumlah saluran pendingin 19 buah dan 91 buah. Dari hasil simulasi didapatkan desain optimal untuk AHR dengan 19 saluran pendingin dicapai pada konsentrasi uranil nitrat 2% dan diameter saluran pendingin 3 cm, sedangkan untuk AHR dengan 91 saluran pendingin dicapai pada konsentrasi uranil nitrat 3% dan diameter saluran pendingin 2 cm. kedua desain memiliki koefisien reaktivitas *void*, koefisien reaktivitas *void* bahan bakar dan koefisien reaktivitas *void* pendingin yang negatif.

Kata kunci— AHR, Monte Carlo, koefisien reaktivitas *void*, kritikalitas.

I. PENDAHULUAN

Salah satu pemanfaatan teknologi nuklir adalah dalam bidang medis untuk diagnostik. Setiap tahunnya berperan lebih dari 25 juta prosedur medis di seluruh dunia, yang terdiri dari sekitar 80% prosedur dari seluruh prosedur radiofarmaka. Di dunia, radioisotop yang paling umum digunakan di bidang medis adalah Tc-99, yang diproduksi dari peluruhan Mo-99.

Sebagian besar Mo-99 berasal dari fisi U-235 yang diiradiasi oleh neutron dari reaktor riset dengan hasil fisi sekitar 6,1%. Saat ini lebih dari 95% dari produk fisi Mo-99 diperoleh dengan menggunakan *Highly Enriched Uranium* (HEU). Produsen dengan skala yang lebih kecil menggunakan *Low Enriched Uranium* (LEU) sebagai target.

Konsep desain reaktor untuk produksi Mo-99 memanfaatkan uranil nitrat atau uranium sulfat sebagai bahan bakar telah banyak diusulkan pada tahun 1940-an dan sekitar 30 reaktor telah dibangun. Namun reaktor yang diterapkan bukan bertujuan untuk produksi radioisotop tetapi untuk tujuan riset atau penelitian, dan saat ini reaktor-reaktor tersebut banyak yang telah ditutup. Hal ini akhirnya berdampak pada penurunan produksi radioisotop dan persediaan di seluruh dunia sehingga menyebabkan kelangkaan.

Kebutuhan terhadap Mo-99 di dunia medis mendorong peneliti untuk mendesain reaktor nuklir yang bertujuan untuk produksi radioisotop fisi. Perhitungan dan beberapa penelitian eksperimental telah menunjukkan bahwa penggunaan AHR bisa menjadi teknologi yang efisien untuk produksi radioisotop fisi karena memiliki beberapa keuntungan

prospektif, yaitu dapat beroperasi pada tingkat daya yang jauh lebih rendah dan membutuhkan lebih sedikit uranium.

Penelitian ini melakukan variasi konsentrasi uranil nitrat pada larutan bahan bakar, ketinggian larutan bahan bakar dalam teras, dan ukuran diameter saluran pendingin. Parameter-parameter tersebut akan digabungkan untuk mendapatkan desain neutronik AHR yang memenuhi syarat sebagai reaktor efisien dan memiliki tingkat keamanan yang tinggi.

Studi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi uranil nitrat dalam bahan bakar dan ketinggian permukaan larutan bahan bakar terhadap kekeritisian, serta mendapatkan konfigurasi teras AHR yang aman untuk beroperasi.

Penelitian dilakukan dengan mensimulasikan desain AHR dan melakukan perhitungan proses transport dan interaksi neutron menggunakan paket program MCNP5. Analisa output program MCNP5 difokuskan pada k (k_{eff}) yang mempresentasikan kondisi reaktor apakah subkritis, kritis atau superkritis.

II. STUDI PUSTAKA

A. *Aqueous Homogeneous Reactor*

AHR (*Aqueous Homogeneous Reactor* / Reaktor Homogen Cair) merupakan jenis reaktor nuklir yang bahan bakarnya berupa garam nuklir yang dilarutkan dalam air. Bahan bakar dan moderatornya merupakan fase tunggal, karena itulah disebut homogen. Berlawanan dengan reaktor heterogen tradisional dimana bahan bakar dan moderatornya berbeda fase. AHR berbeda dengan MSR (*Molten Salt Reactor*) yang walaupun bahan bakarnya memiliki fase cair, moderatornya

masih berbeda dengan bahan bakar, artinya reaksi masih dianggap heterogen.

Beberapa keunggulan AHR dibandingkan dengan jenis reaktor lainnya yaitu^[1]:

- *Burnup* bahan bakar yang tinggi
- Mudah dan sederhana dalam persiapan serta pengolahan bahan bakar.
- Penambahan dan pengurangan bahan bakar secara kontinyu.
- Limbahlebih bersih.
- Ekonomi neutron tinggi.
- Sistem kendali sederhana.

Teras AHR tersusun atas sebuah tabung silinder yang berisi larutan bahan bakar pada pusatnya yang dilapisi reflektor tebal di sekelilingnya. Saluran untuk mengalirkan pendingin tersebar di dalam tabung bahan bakar. AHR biasanya menggunakan bahan bakar UO_2SO_4 (uranil sulfat) atau $UO_2(NO_3)_2$ (uranil nitrat) yang dilarutkan dalam air dengan komposisi mol diatur sesuai dengan karakteristik neutronik yang diharapkan.

B. Reaktor untuk Produksi Isotop Mo-99

Tc-99 yang diproduksi dari peluruhan Mo-99, digunakan di lebih dari 20 juta *radiotracer* dan prosedur diagnostic medis (masing-masing 10-30 mCi) per tahun, setengah digunakan untuk *scan* tulang, dan setengah lainnya kira-kira dibagi antara *scan* ginjal, jantung dan paru-paru. Permintaan Mo-99 dunia diperkirakan sekitar 12000 curie per minggu, yang digunakan dalam 85 persen dari prosedur pencitraan diagnostic dalam kedokteran nuklir.

Produksi utama Mo-99 seluruh dunia terkonsentrasi di sepuluh reaktor nuklir heterogen menggunakan target dan bahan bakar *High Enriched Uranium* (HLU) dan *Low Enriched Uranium* (LEU). Sebagian besar reaktor telah bekerja selama lebih dari 40 tahun^[2].

Para produsen Mo-99 berskala besar total kapasitas pengolahan per minggu 21425 curie, lebih besar dari permintaan di dunia. Sumber daya ini tidak sepenuhnya dieksplorasi karena distribusi Mo-99 harus dilakukan dari pabrik pengolahan yang dekat lokasi reaktor. Berdasarkan laporan, reaktor yang sudah tua dan kapasitas distribusi merupakan dua aspek penyebab kekurangan produksi isotop medis di dunia.

Karena sudah dapat dipastikan bahwa permintaan klinis untuk Tc-99 akan tetap kuat selama beberapa dekade yang akan datang, maka kedokteran nuklir akan membutuhkan pembangunan reaktor baru, penggabungan teknologi baru yang bisa dikembangkan dan kapasitas distribusi yang lebih baik^[2].

III. DASAR TEORI

A. Faktor Pelipatan Efektif dan Reaktivitas

Agar reaksi pembelahan berantai dalam teras reaktor dapat berlangsung, maka kesetimbangan antara laju produksi neutron dan laju kehilangan neutron dalam sistem harus dipertahankan pada kondisi sama. Perbandingan antara jumlah

neutron yang dihasilkan dalam satu generasi dengan jumlah neutron yang dihasilkan pada generasi selanjutnya disebut faktor pelipatan efektif (k_{eff}) yang dinyatakan sebagai berikut:

$$k_{eff} = \frac{\text{jumlah neutron dalam satu generasi}}{\text{jumlah neutron dalam satu generasi sebelumnya}}$$

$$k_{eff} = \eta \epsilon f p P_f P_{th} \quad (3.1)$$

dengan,

- η = jumlah neutron pembelahan yang dihasilkan
- ϵ = faktor pembelahan cepat
- f = faktor penggunaan termal
- p = probabilitas lolos resonansi
- P_f = probabilitas tidak lolos neutron cepat
- P_{th} = probabilitas tidak lolos neutron termal

Dengan menganggap reaktor besar tak terhingga, maka tidak ada kehilangan neutron karena lolos dari reaktor, sehingga persamaan (3.1) menjadi:

$$k_{eff} = \eta \epsilon f p \quad (3.2)$$

Persamaan (3.2) sering disebut dengan persamaan empat faktor. Kritikalitas dibagi menjadi tiga keadaan, yaitu subkritis, kritis dan superkritis. Reaktor nuklir dikatakan subkritis jika $k < 1$ atau kondisi dimana populasi neutron antar generasi semakin berkurang. Reaktor nuklir dikatakan kritis jika $k = 1$ atau kondisi dimana populasi neutron antar generasi konstan. Reaktor nuklir dikatakan superkritis jika $k > 1$ atau kondisi dimana populasi neutron antar generasi bertambah.

Perhitungan nilai k_{eff} pada MCNP5 menggunakan metode monte carlo, dengan mengamati proses interaksi neutron dengan materi yang terjadi secara random. Data hasil proses random tiap generasi tersebut disimpan dan pada akhirnya akan diperbandingkan untuk mendapatkan k_{eff} .

B. Koefisien Reaktivitas Void

Pengaruh *void* terhadap reaktivitas disebut dengan koefisien reaktivitas *void*, dinyatakan dengan persamaan:

$$\alpha_\phi = \frac{\partial \rho}{\partial \phi} = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial \phi} \quad (3.3)$$

dimana,

- α_ϕ = koefisien reaktivitas *void*
- Φ = fraksi *void*
- ρ = reaktivitas
- k = kritikalitas

dimana α disini melambangkan fraksi *void*, atau fraksi *void* dalam bahan bakar.

Koefisien *void* negatif menunjukkan kenaikan fraksi *void* akan menurunkan reaktivitas reaktor, sebaliknya koefisien reaktivitas *void* positif menunjukkan kenaikan reaktivitas reaktor seiring dengan kenaikan fraksi *void*. Untuk tujuan

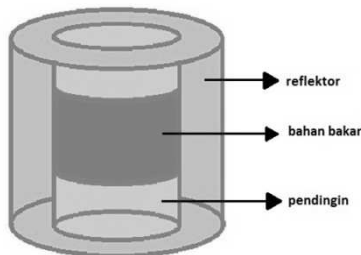
keselamatan reaktor diharapkan suatu reaktor memiliki koefisien reaktivitas *void* yang negatif.

IV. PEMODELAN AHR

A. Konfigurasi AHR

Berbeda dari reaktor AHR konvensional yang sebagian besar merupakan reaktor daya, desain AHR pada penelitian ini merupakan hasil modifikasi yang sesuai untuk produksi radioisotop. Menggunakan *Low Enriched Uranium* (LEU) untuk $UO_2(NO_3)_2 \cdot H_2O$ dengan pengkayaan 19,5% sebagai bahan bakar, dengan H_2O sebagai pendingin dan grafit sebagai reflektor.

Desain AHR hanya terdiri dari tiga bagian, yaitu *core*, reflektor dan bak serta saluran pendingin. Bagian *core* merupakan sebuah tabung silinder untuk tempat bahan bakar yang terbuat dari *stainless steel*. Diameter dalam dan tinggi tabung masing-masing berukuran 50 cm. Bagian dalam tabung merupakan lapisan *stainless steel* dengan tebal 3 mm. Di bagian atas dan bawah *core* terdapat bak pendingin yang juga berbentuk tabung silinder dengan tinggi masing-masing 25 cm. Di dalam *core* terdapat pipa-pipa saluran pendingin yang berfungsi sebagai media transfer panas dari bahan bakar ke pendingin. Pada bagian luar *core* dan bak penampung dilapisi reflektor yang terbuat dari grafit setebal 25 cm.



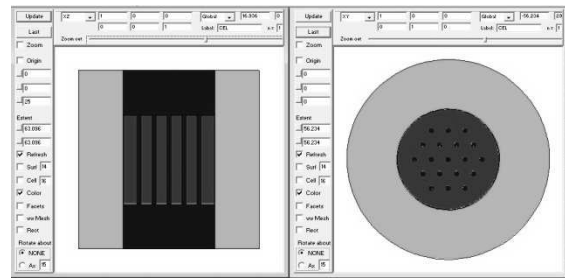
Gbr.1 Konfigurasi AHR

Pada penelitian ini, terdapat 2 jenis desain teras AHR. Perbedaan antara kedua jenis desain ini terletak pada jumlah saluran pendingin di dalam *core*. Pada desain pertama terdapat 19 pipa saluran pendingin sedangkan desain kedua memiliki 91 pipa saluran pendingin.

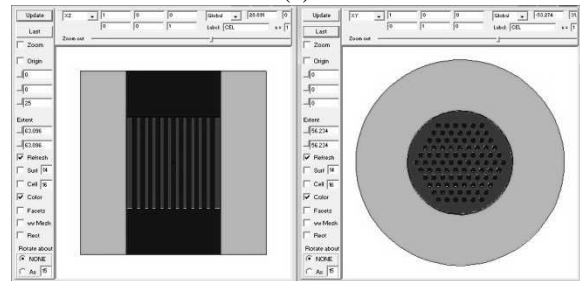
Selanjutnya akan dilakukan variasi untuk mendapatkan desain yang diharapkan, di antaranya dengan memvariasikan ukuran jari-jari saluran pendingin, konsentrasi uranil nitrat dan ketinggian larutan bahan bakar untuk mengetahui pengaruhnya pada kriticalitas AHR.

B. Pemodelan pada MCNP

Data geometri AHR kemudian dilakukan *coding* pada MCNP untuk simulasi.



(a)



(b)

Gbr. 2 Hasil Vised, (a) potongan vertikal dan horizontal AHR dengan 19 saluran pendingin, (b) potongan vertikal dan horizontal AHR dengan 91 saluran pendingin

Pada *data cards* terdapat dua komponen penting yaitu informasi material dan data output yang ingin ditampilkan. Material pengisi *cell cards* adalah sebagai berikut:

- $UO_2(NO_3)_2 \cdot H_2O$ (pengkayaan 19,5%) sebagai bahan bakar
- air sebagai pendingin
- *stainless steel* sebagai saluran pendingin dan lapisan / selimut *core*
- grafit sebagai reflektor
- udara

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Konsentrasi Uranil Nitrat Optimal

Tujuan dari penentuan konsentrasi uranil nitrat optimal adalah untuk menentukan persentase uranil nitrat yang efektif untuk larutan bahan bakar. Indikator yang dijadikan landasan untuk menentukan optimal atau tidaknya output yang dihasilkan adalah konsentrasi uranil nitrat dimana nilai kriticalitasnya merupakan nilai kriticalitas maksimal yang dapat dicapai desain awal.

Untuk langkah awal ada dua variabel yang divariasikan untuk mendapatkan konsentrasi uranil nitrat yang maksimal, yaitu konsentrasi uranil nitrat dalam bahan bakar dan ketinggian permukaan larutan bahan bakar (L).

a. Desain A

Variasi konsentrasi uranil nitrat dan ketinggian permukaan bahan bakar terhadap nilai k pada desain A

konsentrasi uranil nitrat (%)	ketinggian permukaan bahan bakar				
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
1	0.50274	0.76005	0.88529	0.95474	0.99305
2	0.60092	0.88242	1.02532	1.10435	1.15152
3	0.63017	0.91001	1.0558	1.14089	1.19776
4	0.62779	0.90308	1.0524	1.14146	1.20055
5	0.62307	0.89026	1.03874	1.12834	1.19032
6	0.61809	0.8705	1.01888	1.11021	1.17651

Gbr. 3 Desain A

b. Desain B

Variasi konsentrasi uranil nitrat dan ketinggian permukaan bahan bakar terhadap nilai k pada desain B

konsentrasi uranil nitrat (%)	ketinggian permukaan bahan bakar				
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
1	0.48222	0.72425	0.84194	0.90763	0.94872
2	0.58652	0.85353	0.99131	1.06995	1.11899
3	0.61913	0.89046	1.03194	1.11418	1.16897
4	0.62355	0.88813	1.02978	1.12014	1.17707
5	0.62104	0.88154	1.02335	1.11336	1.1746
6	0.61413	0.86801	1.01278	1.10174	1.16479

Gbr. 4 Desain B

Pada rentang 1-3% terlihat bahwa reaktivitas naik. Hal ini dikarenakan adanya kondisi *over moderated*. Kondisi *over moderated* dapat terjadi karena peluang neutron termal untuk berfisi menjadi kecil, sehingga menyebabkan naiknya nilai k. Sebaliknya, pada rentang 4% ke atas terlihat bahwa reaktivitas turun karena adanya kondisi *under moderated*. Kondisi *under moderated* dapat terjadi karena peluang neutron cepat untuk menjadi termal semakin berkurang, yang menyebabkan menurunnya nilai k.

Dari hasil diatas dapat dilihat bahwa nilai k maksimum dari kedua desain AHR diperoleh saat konsentrasi uranil nitrat dalam larutan bahan bakar sekitar 3% sampai 4% sebelum akhirnya nilai k turun. Nilai k akan semakin menurun seiring bertambahnya konsentrasi uranil nitrat diatas 4%. Secara fisis dapat dikatakan bahwa untuk kedua desain AHR ini penggunaan uranil nitrat diatas 4% tidaklah efisien.

B. Penentuan Dimensi Optimal

Setelah didapat konsentrasi uranil nitrat yang optimal, langkah berikutnya adalah menentukan dimensi optimal desain. Dalam penelitian ini AHR dirancang dapat beroperasi dalam segala kondisi kritikalitas, baik subkritis, kritis, maupun superkritis. Walaupun reaktor didesain dapat beroperasi pada kondisi superkritis, diharapkan reaktor tetap aman dan masih dapat dikendalikan jika terjadi ekskursi nuklir. Ekskursi nuklir merupakan suatu keadaan dimana terjadi kenaikan daya yang terlalu cepat dalam waktu singkat.

Oleh karena itu indikator yang dijadikan landasan untuk menentukan dimensi optimal desain adalah nilai k yang mendekati 1,10. Untuk mencapai parameter tersebut, langkah yang dilakukan adalah mempertahankan ketinggian larutan

bahan bakar (L) pada ketinggian maksimum (50cm), variasi konsentrasi uranil nitrat dalam bahan bakar dibatasi sampai 4% dan memvariasikan diameter saluran pendingin (d).

a. Desain A

Tabel 1. Variasi konsentrasi uranil nitrat dan diameter saluran pendingin terhadap nilai k pada desain dengan desain A

konsentrasi uranil nitrat (%)	L (cm)	diameter saluran pendingin		
		1 cm	2 cm	3 cm
1	50	0.99305	0.97299	0.93984
2	50	1.15152	1.13894	1.11593
3	50	1.19776	1.18903	1.17075
4	50	1.20055	1.19338	1.18701

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa nilai k yang paling mendekati 1,10 adalah 1,11593. Maka untuk desain AHR dengan 19 saluran pendingin ditetapkan optimal ketika larutan bahan bakar mengandung 2% uranil nitrat dan diameter saluran pendingin 3 cm.

b. Desain B

Tabel 2. Variasi konsentrasi uranil nitrat dan diameter saluran pendingin terhadap nilai k pada desain B

konsentrasi uranil nitrat (%)	L (cm)	diameter saluran pendingin		
		1 cm	2 cm	3 cm
1	50	0.94872	0.84691	0.68006
2	50	1.11899	1.03966	0.88362
3	50	1.16897	1.11007	0.97732
4	50	1.17707	1.13701	1.023

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa nilai k yang paling mendekati 1,10 adalah 1,11007. Maka untuk desain AHR dengan 91 saluran pendingin ditetapkan optimal ketika larutan bahan bakar mengandung 3% uranil nitrat dan diameter saluran pendingin 2 cm.

C. Ketinggian Larutan Bahan Bakar Terhadap Nilai K

a. Desain A

Tabel 3. Variasi ketinggian bahan bakar terhadap nilai k pada desain A

d (cm)	uranil nitrat	L (cm)	k	stdv
3	2%	10	0.58451	0.00116
3	2%	20	0.85312	0.0017
3	2%	30	0.98866	0.00119
3	2%	40	1.067	0.00177
3	2%	50	1.11593	0.00105

b. Desain B

Tabel 4 Variasi ketinggian bahan bakar terhadap nilai k pada desain B

d (cm)	uranil nitrat	L (cm)	k	stdv
2	3%	10	0.59666	0.00109
2	3%	20	0.84842	0.00156
2	3%	30	0.98319	0.00165
2	3%	40	1.0622	0.00116
2	3%	50	1.11007	0.00153

Pada reaktor homogen, terutama yang menggunakan bahan bakar cair, ketinggian larutan bahan bakar merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kriticalitas reaktor. Dengan mengatur ketinggian permukaan larutan bahan bakar, maka reaktivitas reaktor saat reaktor beroperasi dapat diatur sesuai yang diinginkan.

D. Reaktivitas Void

Reaktivitas void (*void reactivity*) adalah komponen penting dalam kajian keselamatan reaktor nuklir. Suatu reaktor nuklir harus didesain memiliki *inherent saety system*, artinya reaktor tersebut mampu untuk menjaga dirinya sendiri agar tetap selamat, reaktivitas void adalah salah satu komponen dalam *inherent saety system*. Berikut ini adalah hasil simulasi *void reactivity* pada AHR.

a. Desain A

Tabel 5.Reaktivitas void pada AHR dengan 91 saluran pendingin

void	k	stdv
0%	1.11593	0.00105
10%	1.07106	0.00143
20%	1.01249	0.00163
30%	0.93672	0.00165

Koefisien reaktivitas void untuk desain AHR dengan 19 saluran pendingin adalah - 0,5962.

b. Desain B

Tabel 6.Reaktivitas void pada AHR dengan 91 saluran pendingin

void	k	stdv
0%	1.11007	0.00153
10%	1.06276	0.00137
20%	1.00672	0.00118
30%	0.92905	0.00192

Koefisien reaktivitas void untuk desain AHR dengan 91 saluran pendingin adalah - 0,5991.

Dari hasil simulasi yang diperoleh terlihat bahwa pada kedua desain AHR mengalami penurunan nilai k seiring bertambah besarnya rasio void. Hal ini disebabkan karena adanya kondisi *under moderated*. Kondisi *under moderated* terjadi karena peluang neutron cepat untuk menjadi termal semakin berkurang, sehingga menyebabkan menurunnya nilai k.

Pada penelitian ini diketahui bahwa kedua jenis desain reaktor memiliki koefisien reaktivitas void yang negatif. Hal tersebut sesuai dan memenuhi kriteria *inherent safety system*, karena salah satu indikasinya adalah memiliki umpan balik koefisien reaktivitas void negatif.

E. Koefisien Reaktivitas Void Bahan Bakar

Terbentuknya void bahan bakar menyebabkan perubahan fraksi cair dan fraksi uap yang dalam penelitian ini diasumsikan perubahan fraksi tersebut hanya merubah densitas larutan bahan bakar. Koefisien reaktivitas void bahan bakar dihitung dengan cara menghitung besarnya perubahan k_{eff} terhadap kenaikan persentase void bahan bakar. Perubahan k_{eff} dari masing-masing desain dapat dilihat pada hasil berikut:

a. Desain A

Tabel 7.Reaktivitas void bahan bakar desain A

Void bahan bakar	k	stdv
0%	1,11593	0,00105
10%	1,07416	0,00142
20%	1,02949	0,00130
30%	0,97518	0,00152
40%	0,91074	0,00131

Koefisien reaktivitas void bahan bakar untuk desain AHR dengan 19 saluran pendingin adalah - 0,5094.

b. Desain B

Tabel 8.Reaktivitas void bahan bakar desain B

Void bahan bakar	k	stdv
0%	1,11007	0,00153
10%	1,07152	0,00116
20%	1,02599	0,00154
30%	0,97119	0,00160
40%	0,91060	0,00183

Koefisien reaktivitas void bahan bakar untuk desain AHR dengan 91 saluran pendingin adalah - 0,4993.

Dari hasil yang tersebut diketahui pengaruh terbentuknya void pada larutan bahan bakar terhadap k_{eff} teras memberikan nilai yang negatif. Hal ini berarti bahwa kenaikan persentase void bahan bakar akan menurunkan k_{eff} teras reaktor. Penurunan ini akan mengurangi jumlah reaksi fisi yang terjadi pada generasi selanjutnya, sehingga populasi neutron dalam teras berkurang. Berkurangnya populasi neutron akan menurunkan daya reaktor. Turunnya daya reaktor mengakibatkan suhu teras menjadi turun sehingga teras reaktor menjadi aman. Dengan demikian teras reaktor mempunyai kemampuan untuk menjamin keselamatannya sendiri (*inherent safety*).

F. Koefisien Reaktivitas Void Pendingin

Terbentuknya *void* pendingin menyebabkan perubahan fraksi cair dan fraksi uap yang dalam penelitian ini diasumsikan perubahan fraksi tersebut hanya merubah densitas fluida pendingin. Koefisien reaktivitas pendingin dihitung dengan cara menghitung besarnya perubahan nilai k_{eff} terhadap kenaikan persentase *void* pendingin. Perubahan k_{eff} dari masing-masing desain dapat dilihat pada hasil berikut:

a. Desain A

Tabel 9. Reaktivitas *void* pendingin desain A

Void pendingin	k	stdv
0%	1,11593	0,00105
10%	1,11773	0,00097
20%	1,11628	0,00124
30%	1,11474	0,00128
40%	1,11213	0,00124

Dari data di atas terlihat bahwa semakin besar fraksi *void* maka nilai k akan semakin turun, atau dapat dikatakan umpan balik koefisien reaktivitas *void* negatif. Hal tersebut sesuai dan memenuhi kriteria *inherent safety system*, karena salah satu indikatornya adalah umpan balik koefisien reaktivitas *void* negatif.

Didapat untuk rentang 0-10% memiliki koefisien reaktivitas *void* pendingin 0,018 dan untuk rentang 10-40% memiliki koefisien reaktivitas *void* pendingin - 0,0183.

b. Desain B

Tabel 9. Reaktivitas *void* pendingin desain B

Void pendingin	k	stdv
0%	1,11007	0,00153
10%	1,10971	0,00120
20%	1,10426	0,00162
30%	1,10408	0,00183
40%	1,10008	0,00135

Koefisien reaktivitas *void* pendingin untuk desain AHR dengan 91 saluran pendingin adalah - 0,0256.

Pada reaktor seperti AHR yang menggunakan air sebagai moderator dan pendingin sekaligus, terbentuknya *void* pada pendingin akan menurunkan kemampuan moderasi neutron yang diperlukan untuk terjadinya reaksi berantai, sehingga daya reaktor akan menurun akibat berkurangnya laju reaksi pembelahan inti. Peningkatan terbentuknya *void* pendingin akan menyebabkan penurunan kekritisan teras.

1. Batas maksimum yang efektif untuk konsentrasi uranil nitrat dalam larutan bahan bakar untuk AHR adalah 4%.
2. Performa optimal untuk AHR dengan 19 saluran pendingin dapat diperoleh dengan spesifikasi diameter saluran pendingin berukuran 3 cm dan bahan bakar mengandung 2% uranil nitrat. Dan performa optimal untuk AHR dengan 91 saluran pendingin dapat diperoleh dengan spesifikasi diameter saluran pendingin berukuran 2 cm dan bahan bakar mengandung 3% uranil nitrat.
3. Kritikalitas reaktor dapat diatur dengan mengatur konsentrasi uranil nitrat dan ketinggian permukaan larutan bahan bakar.
4. Kedua desain AHR memenuhi aspek keselamatan untuk sebuah reaktor karena memiliki koefisien reaktivitas *void*, koefisien reaktivitas *void* bahan bakar dan koefisien reaktivitas *void* pendingin yang negatif.

REFERENSI

- [1] Lane, James A. *Aqueous Homogeneous Reactors Part I*. Oak Ridge National Laboratory, Miami, Florida, 1958.
- [2] Pasqualini, Enrique E. *Semi-homogeneous Reactor for Mo-99 Production: Conceptual Design*. 33rd International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. Santiago, Chile. 2011.
- [3] Lamarsh, John R. *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley Publishing Company inc. Massachusetts, USA, 1972.
- [4] X5-Monte Carlo Teams. *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code-Version 5, Volume 1: Overview and Theory*. Los Alamos National Laboratory, University of California, 2000.
- [5] Basuki, A. *Monte Carlo Sebagai Metode Pencarian Acak*. ITS, Surabaya, 2004.
- [6] Hammersley J.M. dan D.C. Handscomb. *Monte Carlo Methods*. Matheun, London, 1964.
- [7] Spanier, J. dan E.M. Gelbard. *Monte Carlo Principle and Neutron Transport Problem*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1969.
- [8] Lewis, E.E., W.F. Miller, Jr. *Computational Methods of Neutron Transport*. John Wiley & Sons, Canada, 1984.
- [9] Carter, L.L. dan E.D. Cashwell. *Particle Transport Simulation with The Monte Carlo Method*. TID-26607, U.S. Energy Research and Development Agency Report, 1975.
- [10] X5-Monte Carlo Teams. *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code-Version 5, Volume 2: User Guide*. Los Alamos National Laboratory, University of California, 2000.