

**MAKSIMALISASI FLUKS NETRON CEPAT PADA
POSISI IRRADIASI PUSAT (CIP) REAKTOR**

G.A. SIWABESSY

*Fast Neutron Flux Maximization in the CIP (Central
Irradiation Position) of G.A. Siwabessy Reactor*

Riyatun¹, Prayoto², dan Jazi Eko Istiyanto²

Program Studi Ilmu Fisika

Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

ABSTRACT

Changes of configuration and composition of CIP (Central Irradiation Position) in G.A. Siwabessy (RSG-GAS) reactor have been investigated in order to maximize the fast neutron flux in the CIP to support the sample irradiation program in the reactor.

The flux distribution as a function of neutron energy was obtained by solving multigroup neutron diffusion equation. The multigroup parameters were generated by WIMS/D4 code. The solution of the neutron multigroup diffusion equation was undertaken by UM2DB code using the VAX mainframe computer of BATAN, Serpong.

Normally with water in the CIP, a fast neutron flux of $3.84 \cdot 10^3$ n/cm²-s is obtained and the ratio with respect to the thermal neutron flux is 23.7. Of all the configurations and compositions for CIP tested a very high ratio of fast to thermal neutron flux is obtained (10^5) when the CIP was filled with oxygen gas. The ratio also increases (from 3.72 % to 14.4 %) when the CIP wall was coated with neutron absorbing materials like Cadmium, Argentum, and Gadolinium. The maximum increase in absolute fast netron flux occurs when the CIP was filled with oxygen gas (3.91 %), uranium solution in water (0.26 %), or the CIP wall coated with uranium (0.26 %)

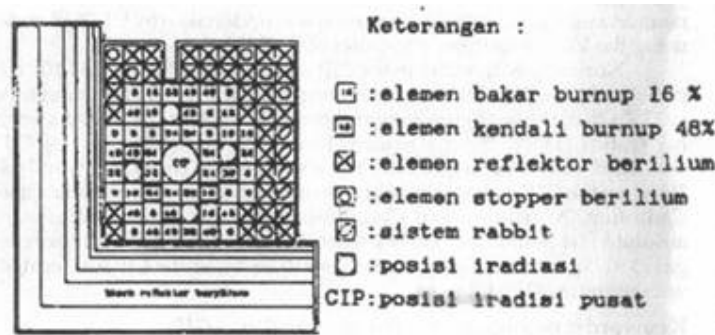
Keywords: *maximization -fast neutron flux – CIP*

PENGANTAR

Reaktor nuklir adalah tempat suatu reaksi inti dapat berlangsung. Reaksi inti biasanya terjadi apabila seberkas partikel jenis x dijatuhkan pada sasaran yang mengandung inti jenis X . Salah satu kemungkinan yang terjadi, setelah reaksi adalah akan keluar partikel y dan tercipta sebuah inti baru jenis Y . Dalam reaktor, neutron merupakan partikel yang amat penting karena neutron adalah zarah netral tak bermuatan dengan massa diam 1,00898 sma sehingga angka kebolehdarian neutron bereaksi dengan inti atom besar. Reaksi inti dengan satu neutron sebagai penembak dapat menghasilkan beberapa neutron hasil reaksi berenergi tinggi. Neutron hasil ini selain dapat digunakan untuk melangsungkan reaksi inti berikutnya, juga dapat mendukung fungsi reaktor sebagai penghasil radiasi.

Fungsi reaktor untuk uji radiasi bahan memerlukan neutron berenergi tinggi. Ini disebabkan oleh neutron yang berenergi tinggi lebih dahsyat sifat merusaknya daripada neutron berenergi di bawahnya, sehingga uji kerusakan radiasi terhadap bahan lebih efisien menggunakan neutron cepat.

Fasilitas untuk uji radiasi bahan yang disediakan dalam reaktor ada di beberapa tempat. Pada konfigurasi reaktor G.A Siwabessy, Puspipstek Serpong, fasilitas radiasi terbesar ukurannya disebut posisi irradiasi pusat (CIP = *Central Irradiation Position*) yang ditempatkan di tengah teras reaktor seperti diperlihatkan pada Gambar 1 (BATAN, 1987).



Gambar 1. Konfigurasi teras seimbang RGS-GAS

Neutron dalam reaktor dapat mempunyai energi antara nol sampai ke energi neutron hasil pembelahan (\pm Mev). Energi ini akan berkurang karena neutron yang bergerak dari tempat berlangsungnya reaksi pembelahan akan mengalami beberapa peristiwa yang menyebabkan energinya berkurang. Jika menemui sebuah inti atom, neutron dapat mengalami beberapa reaksi tergantung pada energi neutron dan sifat inti atom, misalnya terhambur, terserap, atau melangsungkan reaksi pembelahan lagi (Prayoto, 1988). Untuk menyederhanakan kegayutannya pada energi, neutron akan dikelompokkan berdasarkan energinya. Dalam penelitian ini, kelompok dengan energi tertinggi (disebut neutron cepat) perlu ditingkatkan atau kelompok dengan energi terendah (disebut neutron termal) diturunkan jumlahnya agar uji radiasi bahan menjadi maksimal. Ini sebabnya perlu dipikirkan bagaimana konfigurasi dan komposisi CIP agar uji radiasi di dalamnya menjadi lebih efisien, tanpa mengubah konfigurasi dan komposisi komponen lain dalam teras reaktor.

Untuk menggambarkan neutron dalam reaktor digunakan besaran fluks neutron, yaitu hasil kali kerapatan neutron dengan lajunya. Secara fisis fluks ini menyatakan jumlah jejak neutron tiap volume tiap waktu, jadi dinyatakan dalam neutron/cm²-sekon. Peubah yang menggambarkan neutron secara lengkap adalah 3 variabel ruang, kecepatan, arah gerak, massa dan waktu. Ketujuh

peubah jarang sekali diperlukan secara tetap karena dengan memakai peubah yang penting beberapa hitungan dapat dilaksanakan dengan hasil yang tidak terlalu meleset (Lamarsh, 1965). Fluks neutron bersifat skalar dan tujuan studi tertentu dapat dianggap isotropis dan tak gayut waktu, sehingga hanya tergantung posisi dan energinya, $\phi(r, E)$.

a. *Formulasi Persamaan Difusi Neutron.* Beberapa macam proses yang sangat mempengaruhi banyaknya neutron yang setiap saat ada pada reaktor adalah proses produksi, hamburan, serapan, dan difusi. Produksi neutron terbesar berasal dari reaksi pembelahan oleh neutron ada bahan bakar. Produksi yang jumlahnya kecil dan dapat diabaikan berasal dari reaksi yang menghasilkan neutron, misalnya oleh partikel kosmis, reaksi (α, n) . Dalam satu kelompok neutron yang ditinjau fluks neutron dapat bertambah jika ada hamburan neutron yang berasal dari kelompok energi di atasnya atau berkurang karena neutron terhambur oleh inti yang ditemui sehingga memasuki kelompok energi di bawahnya. Neutron juga dapat berdifusi dari kerapatan yang lebih tinggi menuju ke kerapatan yang lebih rendah. Ketika menemui inti atom selain neutron dapat terhambur, neutron juga dapat terserap sehingga jumlah neutron akan berkurang. Persamaan keseimbangan neutron terjadi ketika laju reaksi dalam reaktor yang menghasilkan neutron sama dengan laju reaksi yang mengakibatkan hilangnya neutron, disebut persamaan difusi neutron (seimbang).

$$\begin{aligned}
 &= -V \cdot D(r, E) \nabla^2 \phi(r, E) + S^l(r, E) \phi(r, E) - \int_E^\infty S^s(r, E' > E) \phi(r, E) dE' \\
 &= c(E) \int_0^E S^h(r, E') \phi(r, E') dE' \quad (1)
 \end{aligned}$$

dengan

- $D(r,E)$ = koefisien difusi
 $E(r,E)$ = tampang lintang makroskopik total terdiri atas tampang lintang serapan dan tampang lintang hamburan, $(E H)$
 Σ^s = tampang lintang makroskopik hamburan dari kelompok energi E' menuju kelompok energi E
 $\chi(E)$ = distribusi energi neutron hasil pembelahan,
 $\nu(r,E')$ = jumlah rerata neutron yang menyertai pembelahan,
 $\Sigma^t(r,E')$ = tampang lintang makroskopik reaksi pembelahan.
 Semua besaran di atas bergantung pada posisi dan energi.

Persamaan 1 berlaku untuk seluruh energi neutron. Untuk membedakan fluks neutron berdasarkan energinya, maka indeks 1 menyatakan kelompok neutron dengan energi terbesar, index 2, 3, ...g menyatakan kelompok neutron dengan energi yang semakin rendah. Persamaan 1 yang sifat energinya kontinu dapat ditulis menjadi persamaan berikut yang energinya diskrit.

$$\begin{aligned}
 & -\nabla \cdot (D_g(r) \nabla \Phi_g(r)) - (\Sigma_g^t(r) \Phi_g(r) + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{g' \rightarrow g}^s(r) \Phi_{g'}(r) \Phi_{g'} + \dots \\
 & \chi_g \sum_{g'=1}^G (\nu \Sigma_{g'}^f)_{g'} \Phi_{g'}(r) = 0 \quad (2)
 \end{aligned}$$

dengan

- $D_g(r)$ = koefisien difusi neutron pada kelompok energi g .
 $\Phi_g(r)$ = fluks neutron kelompok energi g .
 $\Sigma_g^t(r)$ = tampang lintang makroskopik total pada kelompok energi g
 $\Sigma_{g' \rightarrow g}^s(r)$ = tampang lintang makroskopis hamburan dari kelompok energi g' ke kelompok energi g .
 χ_g = distribusi energi neutron hasil pembelahan pada kelompok g

$\Sigma_g^f(r)$ = tampang lintang makroskopis pembelahan pada kelompok energi g.

$\nu_g(r)$ = jumlah rerata neutron berenergi g yang dihasilkan pada reaksi pembelahan.

Dengan mendiskritkan peubah energi maka parameter-parameter nuklir dari neutron hanya merupakan fungsi posisi. Terdapat G persamaan simultan untuk G kelompok fluks yang belum diketahui. Penyelesaian persamaan di atas mengandung dua aspek penting, yaitu penyelesaian persamaan difusi itu sendiri juga penentuan parameter/konstanta tiap kelompok yaitu

$\mathbf{V}_g, \mathbf{D}_g, \Sigma_g^a, \Sigma_g^s, \Sigma_{g \rightarrow g}^s, \chi_g$. (Glasstone and Sesonske, 1967).

b. Penentuan Konstanta Kelompok. Data konstanta kelompok diperlukan dalam perhitungan persamaan difusi neutron banyak kelompok. Tampang lintang mikroskopik yang merupakan kebolehdijadian neutron berinteraksi dengan suatu inti atom tergantung pada energi yang dimilikinya. Besaran ini dapat dihitung dengan percobaan atau dihitung dengan pemodelan nuklir secara canggih untuk seluruh rentang tenaga neutron. Sumber informasi data konstanta kelompok merupakan pustaka data yang telah dievaluasi, contohnya ENDF/B (Evaluated Nuclear Data File) dan UKNDL-80 (United Kingdom Nuclear Data Library). Data tampang lintang dalam pustaka data tersebut tersedia dalam interval energi yang amat halus, oleh karena itu perlu dipadatkan untuk menghasilkan konstanta kelompok sesuai dengan kebutuhan pada penyelesaian persamaan difusi. Untuk reaktor bermoderator air ringan (LWR = Light Water Reactor), termasuk reaktor G.A.Siwabessy Serpong, cukup dengan membedakan neutron ke dalam 4 kelompok, yaitu kelompok bertenaga tinggi hasil reaksi pembelahan, kelompok

yang telah mengalami perlambatan, kelompok serapan termal, dan kelompok termal (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Tampang lintang makroskopik kelompok dapat diperoleh langsung dari kerapatan atom penyusun suatu bahan, yaitu

$$\Sigma^x = N_1^x \alpha_1^x + N_2^x \alpha_2^x + \dots + N_k^x \alpha_k^x = \sum N_i \alpha_i \quad (3)$$

N_1, N_2, \dots, N_k adalah rapat atom penyusun.

Dalam keadaan sebenarnya, konfigurasi reaktor bersifat heterogen, baik bentuk maupun atom penyusunnya. Jika diperlakukan secara rinci tentu akan memakan banyak memori komputer. Oleh karena itu, dilakukan homogenisasi terhadap beberapa komponen teras menjadi beberapa sel satuan, yaitu bahan bakar, moderator, reflektor serta elemen-elemen lainnya.

c. Penyelesaian Persamaan Difusi Neutron. Untuk mendapatkan penyelesaian dalam keadaan tunak (*steady state*) dalam reaktor kritis maka kecepatan generasi neutron dari sumber pembelahan secara matematis harus diatur dengan harga keff yakni faktor perlipatan efektif neutron yang merupakan perbandingan jumlah neutron pada suatu saat dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya. Dengan metode beda hingga persamaan 2 diformulasikan pada titik-titik mesh.

Penyelesaian persamaan difusi neutron untuk memperoleh keff dan distribusi fluks tiap kelompok di tiap titik mesh melalui beberapa tahap, yaitu mula-mula diberikan harga tebakan awal untuk flux tiap kelompok atau untuk sumber pembelahan. Dari langkah ini dapat dihitung fluks kelompok pertama tiap titik mesh karena dianggap tak ada hamburan yang menyebabkan energi neutron bertambah sehingga neutron dapat memasuki kelompok di atasnya (*upscattering*). Jika fluks kelompok pertama terhitung maka dapat dihitung fluks kelompok

energi di bawahnya di tiap titik mesh, sampai pada kelompok energi terendah. Hitungan fluks tiap kelompok tiap titik mesh ini disebut iterasi dalam (*inner iteration*). Setelah iterasi dalam maka dihitung lagi sumber pembelahan baru dengan harga keff baru, disebut iterasi luar (*outer iteration*). Iterasi dalam dan luar dilakukan sampai tercapai tingkat konvergensi yang diinginkan (Melville and Hansen, 1964).

Untuk keperluan peningkatan fluks neutron cepat pada CIP maka yang perlu diperhatikan adalah distribusi fluks neutron pada titik-titik yang mewakili posisi CIP, terutama fluks neutron energi tertinggi dan energi termal sehingga penggambaran fluks neutron cepat yang mutlak maupun relatif terhadap fluks neutron termalnya dapat dilaksanakan. Dalam penelitian ini besarnya fluks neutron cepat relatif terhadap fluks neutron termal disebut besaran etha.

d. Deskripsi Program WIMS/D4. Program ini dikembangkan oleh badan penelitian Winfrith dari United Kingdom Atomic Energy. Program ini digunakan untuk menghitung parameter/konstanta kelompok yang digunakan sebagai masukan pada penyelesaian persamaan difusi neutron. Pustaka data diambil dari ENDF/B yang dipadatkan menjadi 69 kelompok neutron, yang menjangkau dari nol eV sampai 10 MeV. Masukan program yang diperlukan, antara lain model sel yang dipilih, hitungan transport yang digunakan, pembagian kelompok tenaga, daerah dan atom penyusunnya, serta waktu operasi bagi bahan yang mengandung bahan bakar. Hasil keluaran yang diperoleh adalah fluks per satuan volume serta fluks tiap titik mesh, konstanta kelompok, yaitu Σ^f , Σ^α , Σ^{tr} , $v\Sigma^f$, χ , D , dan matriks hamburan $\Sigma_{g' \rightarrow g}^s$. Harga-harga tersebut diperhitungkan untuk semua daerah serta untuk sel yang telah dihomogenkan (Taubman, 1981)

e. Deskripsi Program UM2DB. Program ini dikembangkan oleh *Department of Nuclear Engineering*, Universitas Michigan,

Amerika Serikat. Program ini digunakan untuk perhitungan reaktor nuklir dengan teori difusi neutron banyak kelompok dalam 2 dimensi. Masukan program antara lain berupa pemilihan geometri, pembagian mesh, konstanta kelompok yang dipetakan dari konfigurasi dan komposisi reaktor. Hasil yang diperoleh, antara lain berupa faktor perlipatan teras (k_{eff}), fluks neutron, serta laju reaksi untuk semua titik mesh tiap kelompok energi.

CARA PENELITIAN

1. *Materi.* Reaktor yang diteliti adalah reaktor serba guna G.A. Siwabessy (RGS-GAS) yang terdapat di kompleks Puspiptek Serpong. Dipilih konfigurasi teras yang mencapai keadaan seimbang (TWC = *Typical Working Core*), pada daya puncak 30 MW dan seluruh batang kendali dibenamkan penuh.

2. *Peralatan.* Perhitungan neutronik dilakukan dengan program WIMS/D4 untuk membangkitkan parameter kelompok dan program UM2DB untuk menyelesaikan persamaan difusi neutron. Program-program ini dijalankan pada komputer mainframe di laboratorium komputasi BATAN, Serpong. Analisis berikutnya dapat dilaksanakan dengan komputer pribadi.

3. *Cara Penelitian.* Pertama dicari distribusi fluks neutron cepat dan angka k_{eff} dari keadaan sebenarnya dari reaktor, yaitu CIP berisi air. Dari hasil ini dicoba beberapa komposisi dan konfigurasi dari CIP sehingga diperoleh distribusi fluks neutron cepat dengan harga tinggi dan fluks neutron termal dengan harga rendah disertai harga k_{eff} mendekati harga satu. Beberapa konfigurasi dan komposisi ini adalah penggantian bahan pengisi CIP, pemberian sedikit bahan bakar ke dalam CIP dengan beberapa variasi konsentrasi, pelapisan dinding CIP dengan bahan

bakar serta dengan bahan penyerap neutron.

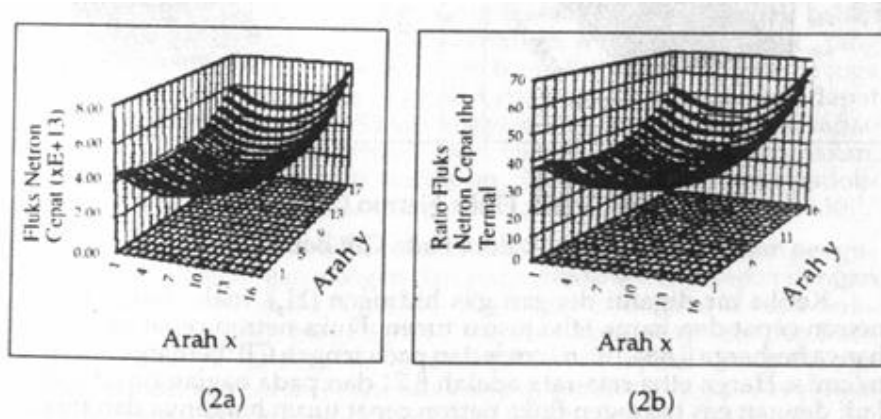
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penyelesaian persamaan difusi neutron memberikan distribusi fluks neutron di tiap titik mesh tiap kelompok disertai harga keff dari reaktor. Pengamatan terhadap titik-titik yang mewakili posisi CIP diperlihatkan pada Tabel

Tabel 1. Ringkuman hasil hitungan

No.	Komposisi CIP	Fluks	Fluks	Etha	Etha	Keff
		cepat rata-rata	cepat pusat CIP	rata-rata	pusat CIP	
1	Air	3,84E+13	2,65E+13	34,18	23,70	1,02574
2	Gas Oksigen	3,99E+13	3,90E+13	10,10E+4	9,97E+4	0,99771
3	Gas hidrogen	0,88E+13	0,10E+13	8,71	0,97	1,01760
4	Air dicampuri Uranium (1,5E-06 atom/b-cm)	3,84E+13	2,65E+13	34,60	23,82	1,02574
5	Air dicampuri Uranium (1,8E-06 atom/b-cm)	3,84E+13	2,65E+13	34,47	23,70	1,02598
6	Air dicampuri Uranium (1,8E-04 atom/b-cm)	3,85E+13	2,65E+13	33,74	23,00	1,02586
7	Air dilapisi Uranium	3,85E+13	2,65E+13	34,50	23,80	1,02593
8	Air dicampuri Cadmium	3,84E+13	2,65E+13	37,55	24,80	1,02481
9	Air dilapisi Argendium	3,84E+13	2,65E+13	35,45	24,50	1,02471
10	Air dicampuri Gadolinium	3,84E+13	2,65E+13	39,10	24,30	1,02543
11	Gas oksigen dilapisi Uranium	3,99E+13	3,90E+13	10,22E+4	9,98E+4	1,02625
12	Gas oksigen dilapisi Cadmium	3,99E+13	3,89E+13	10,25E+4	9,98E+4	0,99782
13	Gas oksigen dilapisi Argendium	3,99E+13	3,89E+13	10,23E+4	9,98E+4	0,00784
14	Gas oksigen dilapisi Gadolinium	3,99E+13	3,89E+13	10,56E+4	10,30E+4	0,99782

Pada CIP yang berisi air (keadaan sebenarnya).rata-rata fluks neutron cepat berharga $3,841.10^{13}$ neutron/cm²s. Semakin ke tengah CIP fluks neutron ini berkurang menjadi $2,65.10^{13}$ n/cm²s. Harga etha, yaitu harga fluks neutron cepat relatif terhadap fluks neutron termalnya adalah 34,18 sedangkan pada bagian tengah CIP berharga 23,7. Dengan demikian makin ke tengah CIP fluks neutron cepat berkurang dan fluks neutron termal bertambah. Secara grafis digambarkan pada Gambar 2a dan 2b di bawah.

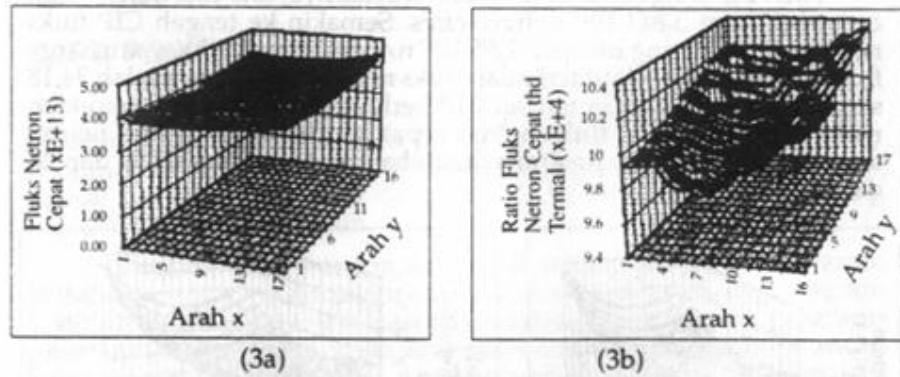


Gambar 2a. Grafik Fluks Netron Cepat CIP Berisi Air

2b. Grafik Etha Pada CIP Berisi Air

Ketika air pada CIP diganti dengan gas oksigen (O_2), rata-rata fluks neutron cepat naik menjadi $3,99 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$ dan pada bagian tengah CIP berharga $3,90 \cdot 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$. Neutron termal, turun drastis sehingga harga etha rata-rata mencapai 105 dan pada bagian tengah CIP berharga 9,97.104. Hasil ini memperlihatkan bahwa gas oksigen dapat mempertinggi fluks neutron cepat sekaligus menurunkan fluks neutron termal pada bagian CIP jika digunakan untuk mengisi posisi CIP. Hal ini dapat diterangkan dari konstanta-konstanta tampang lintang yang dimiliki gas oksigen. Kebolehjadian neutron terserap oleh inti oksigen lebih berpeluang pada neutron cepat ($1,598 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$) daripada neutron termal ($2,576 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$). Pengaruh serapan ini ternyata jauh lebih kecil dibandingkan dengan pengaruh hamburan. Jika bertemu dengan oksigen, maka neutron cepat mempunyai peluang memasuki kelompok di bawahnya sebesar $5,637 \cdot 10 \text{ cm}^{-1}$, ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan neutron yang berada dalam medium air, yaitu $1,054 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Sebaliknya fluks neutron termal pada oksigen berpeluang lebih kecil mendapatkan tambahan neutron dari kelompok di atasnya, yaitu $1,734 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$, sedangkan pada air $1,466 \cdot 10^{-4}$

cm^{-1} . Dari beberapa hal di atas maka dapat dimengerti mengapa neutron termal pada CIP yang berisi gas oksigen dapat berkurang sehingga harga etha menjadi tinggi. Di samping itu fluks neutron cepatpun meningkat (3,91 %) dibandingkan jika CIP berisi air. Secara grafis diperlihatkan pada Gambar 3a dan 3b.



Gambar 3a. Grafik Fluks Neutron Cepat CIP Isi Gas O_2

Gambar 3b. Grafik Etha Pada CIP Berisi Gas O_2

Ketika air diganti dengan gas hidrogen (H_2), maka harga fluks neutron cepat dan harga etha justru turun. Fluks neutron cepat rata-rata hanya berharga $0,884 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$ dan pada tengah CIP berharga $0,1 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$. Harga etha rata-rata adalah 8,71 dan pada bagian pusat 0,97. Jadi dengan gas hidrogen fluks neutron cepat turun harganya dan fluks neutron termal meningkat. Hal ini tidak sesuai dengan maksud penelitian ini sehingga gas hidrogen tak dapat digunakan sebagai bahan pengisi CIP agar diperoleh fluks neutron cepat meningkat dan fluks neutron termal menurun. Keadaan ini dapat diterangkan dari kebolehjadian neutron terserap oleh inti hidrogen lebih besar pada kelompok termal ($1,906 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$) daripada kelompok cepat ($5,00 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$). Meskipun serapan ini masih lebih kecil pengaruhnya dibandingkan dengan kebolehjadian kelompok termal memperoleh tambahan neutron yang berasal dari hamburan di kelompok atasnya, yaitu sebesar $1,448 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

¹. Sementara itu fluks neutron cepat mempunyai peluang lebih besar terhambur dan memasuki kelompok di bawahnya, yaitu sebesar $9,671 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$. Harga ini lebih besar jika dibandingkan dengan pada air yaitu $1,054 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$.

Ketika air dalam CIP dicampuri bahan bakar uranium yang terlarut dalam UO_2 , $(\text{NO}_3)_2$ dengan konsentrasi uranium rendah, yaitu $1,8 \cdot 10^{-08} \text{ atom/b}^2\text{-cm}$, $1,8 \cdot 10^{-06} \text{ atom/b-cm}$ dan $1,8 \cdot 10^{-04} \text{ atom/b-cm}$, terjadi kenaikan harga fluks neutron cepat. Kenaikan harga fluks neutron cepat ini disertai dengan naiknya fluks neutron termal sehingga harga β akan turun dengan naiknya konsentrasi larutan. Hal ini dapat diterangkan dengan kenyataan bahwa pada larutan yang terjadi konstanta kelompok (serapan, hamburan, dan difusi) hampir sama dengan air, hanya koefisien reaksi pembelahan meningkat. Harga k_{eff} pada komposisi CIP ini naik menjadi 1.02598 sehingga tingkat kekritisan reaktor bertambah.

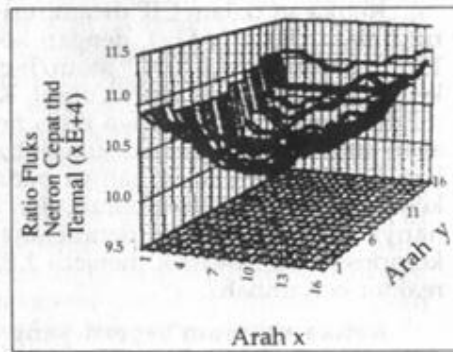
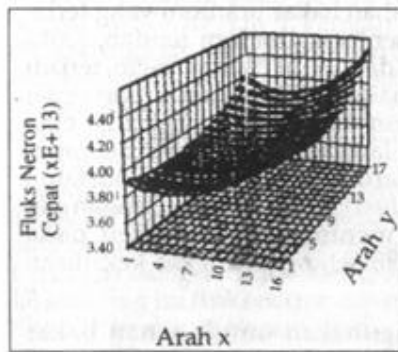
Ketika uranium seperti yang digunakan untuk bahan bakar dilapiskan pada dinding CIP setebal 0,01 cm sementara itu CIP berisi medium air, diperoleh hasil bahwa fluks neutron cepat rata-rata naik menjadi $3,85 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{-s}$, harga relatif terhadap fluks neutron termalnya juga naik menjadi 34,5: Jika CIP berisi medium gas oksigen maka fluks neutron cepat rata-rata naik menjadi $3,99 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{-s}$, harga relatif terhadap fluks neutron termalnya menjadi $10,45 \cdot 10^4$. Pemberian lapisan uranium ini juga disertai dengan tingkat kekritisan reaktor naik menjadi 1,002593.

Ketika lapisan pada dinding CIP tidak terbuat dari bahan bakar, tetapi terbuat dari bahan-bahan yang biasanya dipakai untuk bahan penyerap neutron, tidak diperoleh kenaikan fluks neutron cepat. Yang terjadi adalah penurunan fluks neutron termal sehingga harga β juga naik. Ini dapat diterangkan karena bahan-bahan tersebut tak dapat menghasilkan reaksi pembelahan tetapi mempunyai koefisien serapan yang tinggi pada neutron termal. Dan bahan-bahan yang digunakan, yaitu aluminium, argentum, cadmium, dan

gadolinium, maka gadoliniumlah yang menyebabkan harga etha paling tinggi, yaitu $3,99 \cdot 10^{13}$.

Ketika hasil-hasil tersebut di atas digabungkan, yaitu bahan pengisi CIP diganti dengan gas oksigen dan pada dinding CIP dilapisi dengan bahan gadolinium maka diperoleh hasil yang maksimal berupa fluks neutron cepat mutlak seharga $3,99 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{-s}$ dan relatif terhadap fluks neutron cepatnya seharga $10,56 \cdot 10^4$. Pemberian lapisan yang berupa bahan-bahan non bahan bakar tidak terjadi kenaikan tingkat kekritisan reaktor. Secara grafis hasil ditampilkan dalam Gambar 4a dan 4b.

Secara umum fluks neutron cepat semakin berkurang jika mendekati tengah CIP, sedangkan fluks neutron termalnya bertambah. Ini disebabkan oleh neutron akan terhambur oleh medium sehingga energinya turun dan memasuki kelompok termal. Oleh karena itu grafik fluks neutron cepat maupun grafik etha lebih rendah di bagian tengah CIP. Besarnya fluks neutron cepat yang ada pada titik-titik tepi CIP tidak sama besar. Meskipun bahan bakar dan bahan kendali secara simetris mengelilingi CIP tetapi masing-masing mempunyai harga fraksi bakar yang tidak sama sehingga parameter-parameter nuklirnya juga tidak sama. Ini yang menyebabkan harga fluks neutron cepat pada $x = 1$ (ujung kiri) berbeda dengan harga pada $x = 17$ (ujung kanan).



Gambar 4a. Grafik Fluks Neutron Cepat CIP Berisi Gas Oksigen Dilapisi Gadolinium

Gambar 4b. Grafik Etha Pada CIP Berisi Gas Oksigen Dilapisi Gadolinium

Grafik etha memperlihatkan gambar patah-patah sehingga menunjukkan ralat yang cukup besar. Ini disebabkan oleh harga etha pada satu titik mesh yang diperoleh dengan membagi harga fluks neutron cepat dengan fluks neutron termalnya dilakukan dengan kalkulator. Idealnya harga etha ini diperoleh dengan program komputer yang dapat membaca langsung fluks neutron cepat dan fluks neutron thermal hasil keluaran program UM2DB sekaligus menampilkan harga etha yang dimaksud sehingga resiko kesalahan akibat salah baca, salah hitung serta pembulatan dapat dikurangi.

KESIMPULAN

Dari beberapa konfigurasi dan komposisi CIP yang dicoba dianalisis, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Gas oksigen jika digunakan sebagai bahan pengisi CIP mempertinggi fluks neutron cepat pada CIP, yakni mencapai $3,99 \cdot 10^{13}$ n/ cm² -s sekaligus menurunkan fluks neutron termal sehingga tercapai harga fluks neutron cepat relatif terhadap neutron termal sebesar 105.
2. Bahan bakar uranium yang dimasukkan dalam CIP maupun yang dilapiskan pada dinding CIP kurang efektif untuk meningkatkan fluks neutron cepat karena diiringi oleh naiknya tingkat kekritisasi reaktor.

3. Bahan penyerap neutron, yakni cadmium (Cd), aluminium (Al), argentum (Ag), dan gadolinium (Gd), jika digunakan sebagai lapisan pada dinding CIP, menurunkan neutron termal pada CIP sedangkan fluks neutron cepat tidak berubah.
4. Dari berbagai konfigurasi dan komposisi yang dicoba, diperoleh harga fluks neutron cepat yang maksimal secara mutlak maupun relatif terhadap neutron termalnya, jika bahan pengisi CIP adalah gas oksigen dan dinding CIP diberi lapisan gadolinium (Gd)

DAFTAR PUSTAKA

BATAN, 1987, *Safety Analysis Report - Rev.6*, BATAN, Jakarta.

Duderstadt, J.J and L.J. Hamilton, 1976, *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons.Inc., New York.

Glasstone, S and K.F. Sesonske, 1967, *Nuclear Reactor Engineering*, D. Van Nostrand, Co., New Jersey.

Kuntjoro, S., 1990, *Benchmark Calculation for LEU Fuel Type*, Training Report, KFA - Julich Fed. Rep. Germany.

Lamarsh, J.R., 1965, *Introduction to Nuclear Theory*, Addison-Wesley Publishing, Co., Massachusetts.

Melville, C. Jr and K.F. Hansen, 1964, *Numerical Methods of Reactor Analysis*, Academic Press, New York.

Prayoto, 1988, *Pengantar Teori Reaktor Jilid I, II, III dan IV*, Bagian Teknik Nuklir Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Taubman, C.J and J.H. Lawrence, 1981, *WIMS/D4 - Version 100 and Catalog Procedure*, Energy System Analysis Division - NEA Data Bank. Winfrith.