

ANALISIS PENGARUH IRADIASI FLUENS NEUTRON CEPAT TERHADAP BERILIMUM REFLEKTOR REAKTOR RSG-GAS

Sri Kuntjoro

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN

Diterima editor 07 April 2010

Disetujui untuk dipublikasi 08 Juni 2010

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH IRADIASI FLUENS NEUTRON CEPAT TERHADAP BERILIMUM REFLEKTOR REAKTOR RSG-GAS. Telah dilakukan analisis iradiasi fluens neutron cepat terhadap berilium reflektor reaktor RSG-GAS. Analisis dilakukan dengan cara melakukan pengukuran fluks neutron di posisi berilium elemen dan berilium blok yang berfungsi sebagai reflector. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan apakah ada pengaruh fluens neutron selama berilium berada di teras reaktor. Selain cara tersebut dilakukan pula visualisasi untuk memastikan ada tidaknya deformasi pada berilium akibat iradiasi. Hasil pengukuran fluks dan fluens neutron cepat maksimal pada daya 200 kW untuk berilium elemen posisi E-2 sebesar $2,30E+07$ n/cm²s dan $4,19E+17$ n/cm², J-8 sebesar $3,70E+07$ n/cm²s dan $6,74E+17$ n/cm². Hasil pengukuran pada posisi B-3 sebesar $2,19E+12$ n/cm²s dan $3,99E+22$ n/cm², G-10 sebesar $2,12E+12$ n/cm²s dan $3,86E+22$ n/cm², serta berilium blok posisi (5-6) sebesar $5,02E+07$ n/cm²s dan $9,15E+17$ n/cm², (C-D) sebesar $2,32E+07$ n/cm²s dan $4,23E+17$ n/cm². Deformasi yang diperoleh untuk berilium elemen ($\Delta L/L$) posisi E-2 sebesar $1,12E-08$, J-8 sebesar $1,84E-08$, B-3 sebesar $1,60E-03$, posisi G-10 sebesar $1,55E-03$, sedangkan pada berilium blok di posisi 5-6 sebesar $2,52E-08$ dan C-D sebesar $1,13E-08$. Dari hasil ini disimpulkan tidak terjadi deformasi pada berilium elemen dan berilium blok. Hasil ini dibuktikan pula dari pengamatan visual, dimana tidak terlihat adanya deformasi pada berilium tersebut.

Kata Kunci : fluks, fluens, berilium elemen, berilium blok

ABSTRACT

ANALYSIS OF INFLUENCE OF FAST NEUTRON FLUENS IRRADIATED TO BERYLLIUM ELEMENT OF THE RSG-GAS REACTOR. Analysis of influence fast neutron fluence irradiated to the RSG-GAS beryllium reflector have been done. Methods of analysis was carried out by measuring fluxes neutron in beryllium element and block position that function as reflector. The calculation done for determination it is there any influence of neutron as long as beryllium in the core. Beside that, visualization done to make sure it there is any deformation at beryllium as effect of irradiation. Fluxes and fluences of beryllium element measurement result in 200 kW reactor power are $2.30E+07$ n/cm².sec and $4.19E+17$ n/cm² in position E-2, $3.70E+07$ n/cm²s and $6.74E+17$ n/cm² in position J-8, $2.19E+12$ n/cm²s and $3.99E+22$ n/cm² in position. Measurement results in the position B-3 are $2.12E+12$ n/cm²s and $3.86E+22$ n/cm² in position G-10 respectively. Other result are fluxes and fluence in beryllium block, those are $5,02E+07$ n/cm²s and $9,15E+17$ n/cm² in position (5-6), and $2,32E+07$ n/cm²s and $4,23E+17$ n/cm² in position (C-D). Deformation ($\Delta L/L$) results for beryllium element are $1,12E-08$ in position E-2, $1,84E-08$ in position J-8, $1,60E-03$ in position B-3, and $1,55E-03$ in position G-10. In beryllium block deformation results are $2,52E-08$ in position (5-6) and $1,13E-08$ in position (C-D). Those results are shown unseem deformation in beryllium element and beryllium block and demonstrably by visual observation in reactor hot cell.

Key words : flux, fluence, beryllium element, beryllium block

PENDAHULUAN

Berilium elemen/blok digunakan di reaktor nuklir sebagai reflektor. Hal ini karenaampang lintang serapan berilium untuk neutron lambat sangat kecil, sedangkan tampang lintang serapan terhadap neutron cepat sangat besar. Di dalam teras reaktor berilium terkena iradiasi neutron cepat dan sinar gamma secara terus menerus. Reaksi berilium dengan neutron cepat secara terus menerus akan membentuk gas helium di dalam berilium yang jumlahnya cukup signifikan. Keberadaan gas helium dalam berilium akan mengakibatkan berilium mengalami penggelembungan atau dikenal dengan deformasi berilium

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian tentang terbentuknya gas helium akibat iradiasi berilium oleh neutron cepat. Scaffidi, F dari Argentina dengan penelitiannya menyebutkan akan terjadinya kerusakan pada berilium setelah terkena iradiasi neutron cepat ($E_n > 1\text{MeV}$) sebesar 2,45, 2,1 dan 2,30 dpa untuk suhu 200 °C, 485 °C dan 600 °C[1]. Andrzejewski, K dkk melakukan penelitian tentang pengaruh keberadaan helium dalam berilium, dimana hasilnya diperoleh adanya perubahan reaktivitas teras setelah reaktor beroperasi sembilan dan 18 siklus[2]. Gol'tsev, V.P, dkk telah melakukan penelitian tentang terjadinya *swelling* pada 400 μ bubuk berilium akibat terbentuknya gas helium setelah terkena iradiasi neutron cepat $> 0,8$ MeV pada suhu 550 °C, 650 °C dan 800 °C[3]. Selanjutnya beberapa peneliti juga mengadakan penelitian[4,5,6], tentang terbentuknya gas helium dan hasilnya adalah akan terbentuknya gas helim sebanyak 30-1000 ppm setelah teriradisi oleh fluens neutron sebesar $(0,3-1,8)10^{22}$ n/cm² untuk $E_n > 0,1\text{MeV}$.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui banyaknya gas helium serta besarnya deformasi yang terjadi pada berilium elemen dan berilium blok yang berada di teras reaktor RSG-GAS. Perlunya penelitian ini dilakukan adalah dengan mengetahui besarnya deformasi yang terjadi dapat diketahui apakah deformasi akan menyebabkan tertutup atau tidaknya kanal pendingin antara berilium elemen dengan bahan bakar serta antara berilium blok dengan teras reaktor. Bila kanal pendingin antara berilium elemen dan bahan bakat tertutup akan menyebabkan bahan bakar dapat meleleh karena kekurangan pendingin (*blocked cooling channel*), sedangkan bila kanal pendingin pada berilium blok tertutup akan menyebabkan berilium blok tidak dapat diputar posisinya untuk mendapatkan pemerataan penerimaan fluks neutron. Masalah tersebut sangat penting karena sangat mempengaruhi pada keselamatan pengoperasian reaktor, keselamatan pekerja, dan keselamatan lingkungan.

Metodologi penelitian untuk menentukan banyaknya gas helim yang terbentuk dan besarnya deformasi pada berilium elemen dan blok dilakukan dengan dua cara. Cara pertama adalah dengan kombinasi pengukuran dikombinasikan dengan perhitungan untuk menentukan jumlah helium yang terbentuk di berilium dan kedua melalui mengamatan secara visual. Metodologi pertama dilakukan dengan cara melakukan pengukuran fluks neutron cepat diposisi berilium. Pengukuran dilakukan di posisi berilium elemen dan berilium blok. Selanjutnya setelah mengetahui fluks neutron dilakukan perhitungan terbentuknya helium dan tritium untuk mengetahui seberapa banyak helium terjadi akibat teriradiasinya berilium oleh fluks neutron. Perhitungan dilakukan berdasarkan persamaan peluruhan serentak dan tunda dari berilium akibat iradiasi neutron cepat. Metode terakhir adalah melakukan pengamatan secara visual pada berilium yang telah teriradisi di dalam *hot cell* RSG-GAS. Hasil visualisasi untuk mendukung adanya kesesuaian antara hasil perhitungan dan hasil pengamatan.

Dari pengukuran yang ada, fluens terbesar diterima oleh berilium elemen yang berada diposisi teras reaktor B-3 dan G-10. Fluens neutron yang diterima oleh berilium di posisi B-3 sebesar $3,99\text{E}+22$ n/cm², sedangkan diposisi G-10 adalah $3,86\text{E}+22$ n/cm². Deformasi ($\Delta\text{L/L}$) yang terjadi diposisi tersebut sebesar berturut-turut sebesar $1,60\text{E}-03$ dan $1,55\text{E}-03$.

TEORI

Pengukuran Fluks Neutron, Dan Perhitungan Deformasi Berilium

Interaksi antara neutron dengan material digunakan untuk mengukur fluks neutron. Cara yang dilakukan adalah dengan melakukan aktivasi sampel kecil material diposisi tertentu sesuai dengan posisi yang akan ditentukan fluks neutronnya. Pemilihan sampel yang akan digunakan sebagai pengukur fluks neutron bergantung dengan energi neutron akan ditentukan, dimana setiap sampel mempunyai tampang lintang serapan neutron yang berbeda. Untuk pengukuran neutron energi cepat pada penelitian ini digunakan sampel nikel.

Laju perubahan atom dari sampel yang diaktivasi adalah jumlah atom yang teraktivasi dikurangi dengan laju peluruhan, dapat dilihat pada rumus,

$$dN/dt = \sigma_a N_t \phi - \lambda N \quad [7] \quad (1)$$

dengan :

- N = jumlah atom sampel pada waktu t
N₀ = jumlah atom awal pada sampel
σ_{act} = tampang lintang aktivasi untuk sampel
φ = fluks neutron diposisi tertentu
t = waktu iradiasi
λ = 0,693/t_{1/2}, dimana t_{1/2} adalah waktu paro sampel

Penyelesaian dari persamaan (1) adalah sebagai berikut;

$$N(t) = \frac{\sigma_a N_0 \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

Karena Nλ adalah aktivitas, maka aktivitas pada waktu t adalah;

$$A(t) = \sigma_a N_0 \phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

Bila sampel dipindahkan dari tempat iradiasi, maka sampel akan mengalami peluruhan selama waktu t₁ setelah iradiasi, maka fluks neutron dapat ditentukan sebagai berikut;

$$\phi = \frac{A(t_1) \exp(\lambda t_1)}{\sigma_{act} N_0 \exp(-\lambda t)} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{AA(t)}{mNa\sigma_{act}N_0 \exp(-\lambda t)} \quad (5)$$

dengan,

- A(t₁) = aktivitas pada saat t₁
A = berat atom
m = massa sampel
Na = bilangan Avogadro

Setelah fluks neutron cepat dapat ditentukan, selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan fluens neutron yang mengiradiasi setiap berilium yaitu;

$$\text{Fluens} = (\text{Daya total (MWD)}) * \text{fluks neutron di posisi berilium/daya pada pengukuran fluks neutron diposisi berilium (n/cm}^2) \quad (6)$$

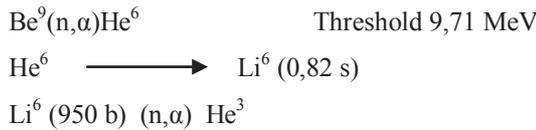
Berdasarkan fluens hasil perhitungan dapat dihitung deformasi berilium sebagai berikut;

$$\text{Deformasi} = \Delta L / L = 1,829 \cdot 10^{-3} \times \left(\frac{\phi t}{10^{22}}\right)^{1,035} \quad [8] \quad (7)$$

Menentukan Jumlah Gas Helium Pada Berilium Paska Radiasi

Berilium terbentuk melalui proses sebagai berikut;

1. Reaksi n,α



Penampang lintang tangkapan untuk reaksi primer sebesar 50 milibarn, untuk energi neutron yang datang sebesar 2-4 MeV dan 14,1 MeV.

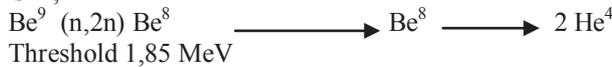
Untuk penampang lintang absorpsi sebesar 50 milibarn = $50 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$ dan jumlah atom He yang diproduksi pertahun

$$\begin{aligned} &= 2 \times \sigma_c \times NPV \dots\dots\dots (8) \\ &= 2 \times 50 \times 10^{-27} \times 10^4 \times 10^{14} \times (3,15 \times 10^7 \text{ s/tahun}) \\ &= 3,15 \text{ atom He pertahun (untuk fluks orde } 10^{14}) \end{aligned}$$

Volume He yang diproduksi oleh Be per gram mol adalah

$$\begin{aligned} &= 3,15 \times \frac{N}{10^4} \times \frac{1}{9} \times \frac{2,24 \times 10^3}{N} [9] \\ &= 0,78 \text{ cc/g mol He pertahun (untuk fluks orde } 10^{14}) \end{aligned} \quad (9)$$

2. Reaksi n,2n



Pada reaksi ini penampang lintang tangkapan sebesar 200 mb, pada energi 1,85 MeV, dan jumlah atom He yang diproduksi pertahun adalah ;

$$\begin{aligned} &= 2 \times 200 \times 10^{-27} \times 10^4 \times 10^{14} \times (3,15 \times 10^7 \text{ s/tahun}) \\ &= 12,6 \text{ atom He pertahun (untuk fluks orde } 10^{14}) \end{aligned}$$

Volume He yang diproduksi oleh Be per gm adalah

$$\begin{aligned} &= 12,6 \times \frac{N}{10^4} \times \frac{1}{9} \times \frac{2,24 \times 10^3}{N} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 3,4 \text{ cc/gm He pertahun (untuk fluks orde } 10^{14}) \\ \text{Total Volume He yang terbentuk} &= 0,78 \text{ cc/gm He pertahun} + 3,4 \text{ cc/gm He pertahun} \\ &= 4,18 \text{ cc/gm He pertahun pada NTP} \\ &\quad \text{(untuk fluks orde } 10^{14}) \end{aligned}$$

Visualisasi Deformasi Berilium

Visualisasi deformasi dilakukan di fasilitas *hot cell* reactor RSG-GAS. Hal ini dilakukan karena berilium yang telah teriradiasi akan menghasilkan tritium. Tritium memancarkan sinar gamma yang berbahaya bagi manusia, oleh karenanya pengamatan visual hanya dapat dilakukan di ruangan yang kedap radiasi (*hot cell*).

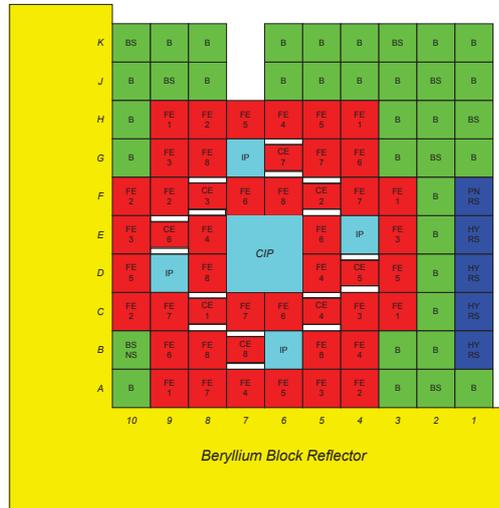
TATA KERJA

Pengukuran Fluks Neutron

Prasarat yang harus dilakukan adalah berupa persiapan sampel Ni, fasilitas untuk iradiasi siap digunakan pada pengukuran, operator reaktor siap mengoperasikan reaktor, reaktor dioperasikan pada daya 200 kW, peralatan dan bahan pengukuran, keping Ni, pinset, pemegang sampel (batang aluminium), perangkat MCA dan detektor NaI, sumber standar serta kotak timbal untuk mengangkut sampel yang telah diiradiasi.

Adapun langkah eksperimen yaitu meletakkan sampel Ni pada posisi tertentu pada pemegang aluminium, selanjutnya memasukkan pemegang sampel pada berilium elemen

diposisi yang telah ditentukan. Selanjutnya operasikan reaktor pada daya 200 kW dan biarkan sampel teriradiasi selama 2 jam dan setelah itu keluarkan di kolam penyimpanan sementara. Setelah sampel dikeluarkan semua matikan reactor. Selanjutnya sampel diambil dan dimasukkan ke kotak timbal dan dibawa keruang cacah. Di ruang cacah dilakukan pencacahan sampel dan dihitung fluks neutron di posisi setiap sampel pada posisi berilium yang telah ditentukan. Posisi pengukuran fluks neutron cepat ditunjukkan pada Gambar 1.



Note : FE = Elemen Bakar, CE = Elemen Kendali, BE = Be Reflektor, BS = Be Reflektor dengan plug, IP = Posisi Iradiasi, CIP = Posisi Iradiasi Pusat, PNRS = Sistem Rabbit Phneumatik, HYRS = Sistem Rabbit Hidraulik

Gambar 1. Posisi pengukuran fluks neutron di teras RSG-GAS

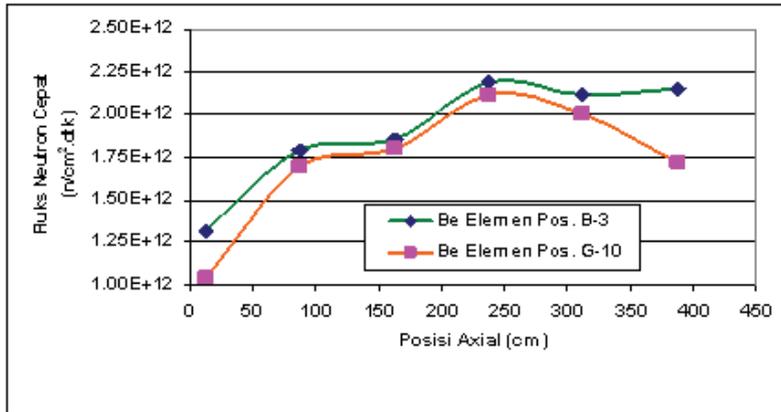
Prosedur Visualisasi Berilium

Pengukuran berilium secara visual dilakukan dengan langkah sebagai berikut : Prasyarat adalah reaktor dalam kondisi *shutdown*. Kemudian dilakukan pembuatan PPAT untuk mengeluarkan berilium elemen dari teras reaktor. Selanjutnya keluarkan berilium elemen posisi B-3 dan G-10 dari teras reaktor dan dimasukkan ke rak penyimpanan sementara. Biarkan berilium di rak penyimpanan sementara selama 2 hari. Langkah selanjutnya adalah menyiapkan meja di dalam *hot cell* yang akan digunakan untuk meletakkan berilium guna melakukan pengamatan visual. Setelah meja siap maka masukkan berilium posisi teras B-3 ke dalam *hot cell*, dan lakukan pengamatan visual dengan mengamati data visualnya. Setelah pengamatan selesai, kembalikan berilium keposisi semula di rak penyimpanan sementara dan dilakukan langkah pengamatan seperti pengamatan terdahulu untuk berilium posisi teras G-10.

HASIL DAN PEMBAHASAN

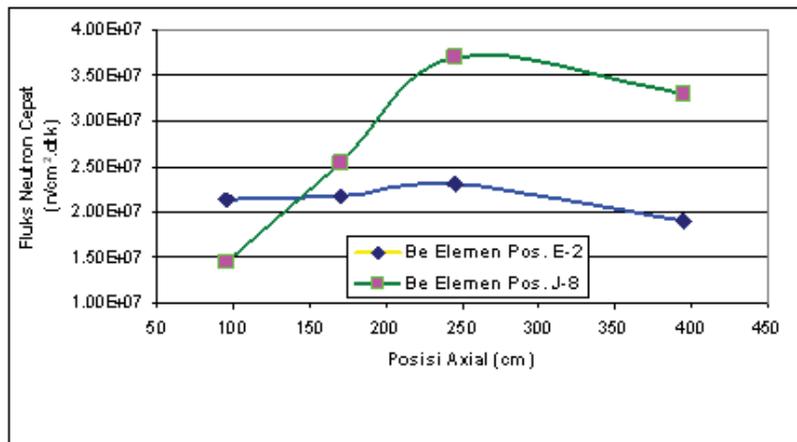
Hasil Pengukuran Fluks Neutron

Pengukuran fluks neutron dilakukan di teras reaktor RSG-GAS diposisi B-3, G-10, E-2, J-8, 5-6 dan C-D. Pengukuran fluks neutron cepat dilakukan pada daya reaktor 200 kW dan hasil pengukuran pada berbagai posisi dalam teras ditunjukkan dalam Gambar 2, 3 dan 4.



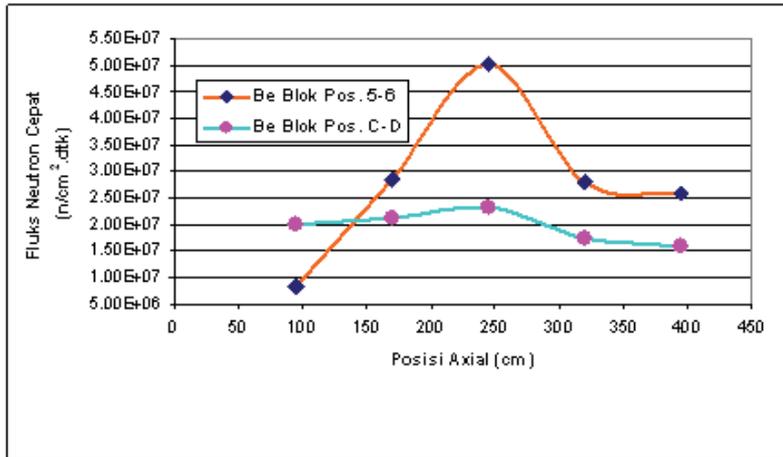
Gambar 2. Fluks neutron cepat di berilium elemen posisi B-3 dan G-10

Pada Gambar 2 terlihat bahwa fluks neutron cepat pada posisi B-3 dan G-10 dalam orde 10^{12} n/cm²s, hal ini karena berilium terletak diapit oleh dua bahan bakar, dimana bahan bakar menghasilkan neutron disetiap proses fisi yang terjadi pada bahan bakar tersebut, sehingga fluks neutron cepat yang mengiradiasi berilium tersebut cukup tinggi. Fluks tertinggi pada posisi B-3 sebesar $2,19E+12$ n/cm²s dan pada G-10 sebesar $2,12E+12$ n/cm²s.



Gambar 3. Fluks neutron cepat di berilium elemen posisi E-2 dan J-8

Pada Gambar 3 terlihat fluks neutron cepat pada posisi E-2 dan J-8 pada orde 10^7 n/cm²s. Fluks neutron cepat tidak cukup besar karena berilium hanya teriradiasi oleh satu buah elemen bakar, sehingga tidak cukup banyak neutron hasil fisi yang mengiradiasi berilium tersebut. Fluks neton cepat tertinggi pada posisi E-2 sebesar $2,30E+07$ n/cm²s, dan di posisi J-8 sebesar $3,70E+07$ n/cm²s.



Gambar 4. Fluks neutron cepat di berilium elemen posisi 5-6 dan C-D

Dari Gambar 4 terlihat bahwa untuk berilium elemen yang berada diluar konfigurasi bahan bakar, yaitu berilium blok posisi 5-6 dan posisi C-D, neutron yang mengenai berilium sedikit, karena berasal neutron berasal dari proses refleksi dari neutron yang berasal dari proses fisi. Fluks neutron tertinggi di berilium blok adalah di posisi 5-6 sebesar 5,02E+07 n/cm²s dan di posisi C-D sebesar 2,32E+07 n/cm²s.

Fluens Neutron

Hasil fluens selama operasi reaktor dari teras 1 hingga teras 68 ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Fluks dan fluens neutron di posisi berilium elemen/blok

| No. | Fluks/fluens neutron cepat | Posisi berilium blok / elemen | | | | | |
|-----|--------------------------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 5-6 | C-D | E-2 | J-8 | B-3 | G-10 |
| 1 | Fluks rerata (n/cm ² s) | 2,73E+07 | 1,96E+07 | 2,21E+07 | 2,82E+07 | 1,91E+12 | 1,73E+12 |
| 2 | Fluks maks. (n/cm ² s) | 5,02E+07 | 2,32E+07 | 2,30E+07 | 3,70E+07 | 2,19E+12 | 2,12E+12 |
| 3 | Fluens rerata (n/cm ²) | 4,98E+17 | 3,57E+17 | 4,03E+17 | 5,14E+17 | 3,48E+22 | 3,15E+22 |
| 4 | Fluens maksimum (n/cm ²) | 9,15E+17 | 4,23E+17 | 4,19E+17 | 6,74E+17 | 3,99E+22 | 3,86E+22 |

Dari Tabel 1 terlihat bahwa fluens maksimal terjadi pada fluks maksimal, ini karena waktu iradiasi untuk semua berilium sama, yaitu total waktu operasi reaktor mulai dari terbentuknya konfigurasi teras 1 hingga saat ini yaitu teras 68 selama 7,63 tahun.

Perhitungan Deformasi dan Terbentuk Gas Helium pada Berilium.

Berdasarkan hasil pengukuran fluks neutron dan perhitungan fluens neutron dapat dilakukan perhitungan besarnya deformasi ($\Delta L/L$) pada berilium menggunakan persamaan (7), serta jumlah volume helium yang terjadi pada berilium karena teriradiasi selama pengoperasian reaktor. Pada perhitungan menentukan volume helium digunakan persamaan (9) dan (10). Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2. Besarnya deformasi dan volume helium yang terbentuk dihitung dari fluens dan fluks maksimal disetiap posisi berilium. Pengambilan harga maksimal dilakukan untuk memperoleh analisis yang pesimistik, dimana bila pada harga maksimal tidak terjadi deformasi yang dapat menyebabkan penutupan kanal pendingin, maka pada harga yang lain dapat dipastikan kondisi aman pasti diperoleh.

Tabel 2. Besarnya deformasi dan jumlah helium yang terbentuk akibat teriradiasi di teras RSG-GAS selama pengoperasian reaktor

| No. | Hasil perhitungan | Posisi berilium blok/elemen | | | | | |
|-----|---|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 5-6 | C-D | E-2 | J-8 | B-3 | G-10 |
| 1 | Fluens maksimum (n/cm^2) | 9,15E+17 | 4,23E+17 | 4,19E+17 | 6,74E+17 | 3,99E+22 | 3,86E+22 |
| 2 | Deformasi ($\Delta L/L$) | 1,21E-07 | 5,44E-08 | 5,39E-08 | 8,81E-08 | 7,66E-03 | 7,41E-03 |
| 3 | Jumlah He reaksi n,α (cc/gm Be, NTP) | 2,99E-06 | 1,39E-06 | 1,37E-06 | 2,20E-06 | 1,30E-01 | 1,26E-01 |
| 4 | Jumlah He reaksi $n,2n$ (cc/gm Be, NTP) | 1,30E-05 | 6,02E-06 | 5,97E-06 | 9,60E-06 | 5,68E-01 | 5,50E-01 |
| 3 | Jumlah He total (cc/gm Be, NTP) | 1,60E-05 | 7,40E-06 | 7,34E-06 | 1,18E-05 | 6,96E-01 | 6,76E-01 |

Dari Tabel 2 terlihat bahwa deformasi pada berilium sebanding dengan jumlah helium yang terbentuk di berilium dan deformasi yang terbesar terjadi pada berilium elemen posisi B-3 sebesar 7,66E-03. Berdasarkan hasil ini terlihat bahwa penambahan panjang yang terjadi sangatlah kecil. Untuk berilium blok deformasi yang terjadi 1/100.000 kali dibandingkan dengan berilium elemen. Dengan demikian dapat dikatakan tidak terjadi deformasi deformasi baik pada berilium elemen maupun berilium blok.

Hasil Pengamatan Visual

Hasil pengamatan visual pada berilium elemen posisi B-3 dari sisi A-1 dan B-1 dan ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Pengamatan visual berilium elemen posisi B-3 dari sisi A-1

Pada posisi ini tidak terlihat adanya *swelling* yang terjadi, ini terlihat dari penggaris yang berada didepan bahan bakar tidak terlihat melengkung.



Gambar 6. Pengamatan visual berilium elemen posisi B-3 dari sisi B-1

Pada posisi ini juga tidak terlihat adanya *swelling*, ini terlihat pada gambar bahwa penggaris yang berada didepan bahan bakar tidak terlihat melengkung.

Pengamatan visual berilium elemen posisi G-10 dilakukan dari sisi B-1 dan hasilnya terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengamatan visual berilium elemen posisi G10 dari sisi B-1

Pengambilan posisi B-1 karena posisi ini yang berada tepat didepan bahan bakar. Pada posisi ini tidak terlihat adanya *swelling*, ini terlihat dari penggaris yang berada didepan bahan bakar tidak terlihat melengkung.

Dari seluruh pengamatan visual terlihat tidak adanya deformasi pada berilium yang teriradiasi oleh fluens terbesar di teras RSG-GAS. Pengamatan visual ini mendukung hasil perhitungan besarnya deformasi yang terjadi akibat teriradiasinya berilium oleh fluens neutron.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut;

- Deformasi berilium dapat ditentukan dengan cara melakukan pengukuran fluks neutron cepat di posisi teras reaktor dimana berilium itu berada.
- Untuk mendukung hasil perhitungan dapat dilakukan pengamatan visual untuk memeriksa kondisi nyata apakah terjadi atau tidak deformasi pada berilium.
- Deformasi pada berilium sebanding dengan terbentuknya gas helium yang disebabkan teriradiasinya berilium oleh neutron cepat, melalui reaksi (n,α) , maupun reaksi $(n,2n)$.
- Di RSG-GAS selama reaktor beroperasi selang waktu 7,63 tahun deformasi pada berilium elemen maupun berilium blok sangat kecil. Oleh karenanya kondisi berilium elemen maupun berilium blok tidak perlu dikhawatirkan
- Untuk pemerataan penerimaan fluens neutron pada berilium elemen, maka perlu dilakukan penukaran posisi berilium elemen dari posisi tengah teras ke pinggir teras, begitupun sebaliknya

DAFTAR PUSTAKA

1. Scaffidi, F and Sand, C. Tritium and Helium retention in neutron-irradiated beryllium. *Journal on Physica Scripta* 2001 83. 2001
2. Andrzejewski, K and Kulikowska, T. Tritium in neutron irradiated beryllium. Institut fur Kern –und Energietechnik Programm Kerfusion. Reactivity effect of poisoned beryllium block shuffling in the maria reactor. 23rd International meeting on reduced enrichment for research and test reactor. Las Vegas, USA; October 1-5, 200.
3. Gol'tsev, V.P. Swelling of beryllium at high temperatures under large doses of irradiation. *Journal of Atomic Energy*; Vol. 35, No. 3; 2000
4. Chakin, V.P. Radiation damage in beryllium at 70-440 °C and neutron fluence $(0.3-18)10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ($E_n > 0.1 \text{ MeV}$). *Journal of Atomic Energy*; Vol. 101, NO. 4; 2006
5. Snead Lance, I. Low-temperature low-dose neutron irradiation effect on beryllium. *Journal of Nuclear Materials*; Vol.326; 2004
6. Chakin, V.P. Thermal conductivity of beryllium under low temperature high dose neutron irradiation. *Journal of Nippon Genshiryoku Kenkyugo*; JAERI Conf., Japan; 2004
7. Surian Pinem. Pengukuran fluks neutron termal di fasilitas iradiasi RSG-GAS. *Diklat Keahlian Dasar Bidang Tenaga Atom*; PUSDIKLAT-BATAN; 1990
8. Tomberlin, T.A. beryllium -A unique material in nucleat application. 36th International SAMPLE technical conference, INEEL, Idaho, USA; November 15, 2004
9. Alder, K.T. Growth of beryllium under irradiation. *AAEC/E-6*; 2001