

PENGUKURAN FLUKS DAN SPEKTRUM NEUTRON DI FASILITAS DOPING SILIKON RSG-GAS

Amir Hamzah

Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN

Abstrak

PENGUKURAN FLUKS DAN SPEKTRUM NEUTRON DI FASILITAS DOPING SILIKON RSG-GAS. Pengukuran fluks dan spektrum neutron di fasilitas silikon doping RSG-GAS telah dilakukan dengan metode aktivasi keping. Dalam pengukuran distribusi fluks neutron termal, empat buah keping cobalt-aluminium dan tiga buah keping nikel diletakkan di tengah kapsul secara berselang-seling berjarak tiga cm, demikian pula untuk di pinggir kapsul digunakan tiga buah cobalt-aluminium dan empat buah keping nikel. Sedangkan pengukuran spektrum neutron dilakukan di sekitar tengah kapsul yang berdiameter 12,5 cm (5 inci) dan panjang 30 cm menggunakan keping : Co, Cu, Au, Sc, Ag, Fe, Ti, Ni, Mg, Al dan Nb yang sebagiannya dibungkus cadmium. Hasil pengukuran fluks neutron termal rerata di pinggir kapsul sebesar $8,26E12$ n/cm²s dan ditengah sebesar $7,89E12$ n/cm²s, sedangkan fluks neutron cepat di pinggir kapsul sebesar $3,73E11$ n/cm²s dan di tengah sebesar $3,66E11$ n/cm²s. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa distribusi fluks neutron di dalam fasilitas doping silikon RSG-GAS secara radial cukup merata dengan perbedaan kurang dari 5%. Hasil penentuan fluks neutron dari hasil pengukuran spektrum neutron pada daerah termal (< 0,55 eV yaitu energi cut-off cadmium) cukup dekat dengan hasil pengukuran fluks neutron termal di atas dengan perbedaan sekitar 15%, demikian pula untuk fluks neutron cepat (> 1 MeV yaitu energi efektif keping nikel) dengan perbedaan sekitar 16%.

Abstract

NEUTRON FLUX AND SPECTRUM MEASUREMENT AT SILICON DOPING FACILITY OF THE RSG-GAS. Neutron flux and spectrum measurement was done using foil activation method. Four cobalt-aluminium and three nickel foils was lined along capsule centre with 3 cm pitch and three Co-Al and four Ni foils at the end of capsule. Co, Cu, Au, Sc, Ag, Fe, Ti, Ni, Mg, Al and Nb foils were used for neutron spectrum measurement around the center of the capsule of 12,5 cm diameter and 30 cm length. The average of thermal neutron flux in the centre of the capsule is $7,89E12$ n/cm²s and at the end of the capsule is $8,26E12$ n/cm²s, and the average of fast neutron in the centre of the capsule is $3,66E11$ n/cm²s and at the end of capsule is $3,73E11$ n/cm²s. Hence, it can be concluded that the radial distribution of thermal and fast neutron is quite uniform with discrepancy less then 5%. Neutron flux inferred from neutron spectrum measurement at thermal region (< 0,55 eV of cadmium cut-off energy) is quite close to thermal neutron flux determined from the flux measurement with discrepancy about 15%, and for fast neutron flux (> 1 MeV of Ni effective energy) the discrepancy is about 16%.

I. PENDAHULUAN

Di dalam penelitian "penyisipan" (doping) kristal silikon oleh pengotor inti fosfor, hasil dari transmudasi inti silikon yang menangkap sebuah neutron termal, diperlukan data fluks neutron termal dan bentuk spektrum neutron untuk seluruh energi neutron di fasilitas tempat proses doping silikon tersebut terjadi. Untuk memperoleh hasil penelitian yang baik diperlukan data fluks dan spektrum neutron yang akurat. Cukup banyak metoda pengukuran fluks dan spektrum neutron yang telah dikembangkan, salah satunya adalah metoda aktivasi neutron. Prinsip dari metoda tersebut cukup sederhana yaitu dengan mengaktifkan suatu material (foil) yang telah diketahui kadar dan karakteristiknya bila bereaksi dengan neutron, kemudian bahan tersebut diukur aktivitasnya dengan sistem peralatan spektrometri gamma. Pada makalah ini dibahas secara garis besar proses pengaktifan keping, pengukuran aktifitas keping serta penentuan fluks dan spektrum neutron di fasilitas silikon doping RSG-GAS.

Fluks neutron termal dan neutron cepat ditentukan dari hasil pengukuran aktivitas jenuh per inti dari keping yang telah diiradiasi. Sedangkan spektrum neutron ditentukan dengan paket program pengaturan spektrum SAND-II berdasarkan data masukan aktivitas jenuh per inti dari seluruh keping yang digunakan dan spektrum perkiraan awal sebagai. Paket program ini menggunakan metoda gangguan iteratif dalam mencapai kecocokan terbaik (best-fit) spektrum neutron dari data masukan aktivitas seluruh keping yang dipakai terhadap spektrum awal. Untuk memperoleh hasil penentuan spektrum yang akurat hendaknya digunakan spektrum awal yang berasal dari perhitungan teoritis yang mendekati kondisi teras yang sebenarnya.

II. TEORI

II.1. Aktivasi keping^{1,2,3)}

Apa bila sebuah keping diiradiasi di dalam reaktor selama waktu t_i maka akan terjadi reaksi inti target dengan neutron yang menumbuknya dan akan timbul inti baru yang aktif. Besarnya aktivitas inti yang timbul dapat dituliskan sebagai :

$$A = \lambda N e^{-(\lambda+\lambda_n)t_i} \int_0^{t_i} e^{(\lambda+\lambda_n-\lambda_n)t} P(t)R(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

dengan : λ = tetapan peluruhan isotop yang timbul (s^{-1}),
 N = jumlah inti target,

- λ_b = $\sigma_b \phi$, dengan σ_b adalah tampang lintang reaksi inti hasil reaksi, yaitu tetapan waktu terhadap penyusutan (burn-out) inti hasil reaksi yang bereaksi dengan neutron (s^{-1})
- λ_a = $\sigma_a \phi$, dengan σ_a adalah tampang lintang aktivasi inti target, yaitu tetapan waktu terhadap penyusutan (burn-out) inti target yang bereaksi dengan neutron (s^{-1}),
- $P(t)$ = fluktuasi daya terhadap daya referensi reaktor P_0 .
- $R(t)$ = laju reaksi efektif pada daya referensi P_0 (s^{-1}).

Aktivitas tiap keping tersebut dapat diukur dengan sistem detektor radiasi yang memadai setelah keping diiradiasi. Misalkan radiasi dari keping aktif dicacah selama t_c setelah meluruh selama t_w , dan cacahan yang terukur sebesar C, maka aktivitas keping pada akhir iradiasi dapat juga ditulis :

$$A = \frac{\lambda C e^{\lambda t_w}}{\epsilon \eta f (1 - e^{-\lambda t_c})} \dots \dots \dots (2)$$

- dengan :
- ϵ = efisiensi absolut detektor radiasi,
 - η = nisbah cabang (branching ratio) radiasi yang dipancarkan,
 - f = faktor koreksi dari efek perisai diri.

Pada pengukuran fluks neutron di suatu reaktor dengan daya tetap selama iradiasi, laju reaksi dapat dihitung dari persamaan (1) sebagai :

$$R = \int_0^{\infty} \sigma_{cr}(E) \phi(E) dE = \frac{A}{N} S \dots \dots \dots (3)$$

dengan S didefinisikan sebagai tingkat ketidak-saturasi, yaitu :

$$S = \frac{e^{-\sigma_a \phi t_i} - e^{-(\lambda + \sigma_a \phi) t_i}}{1 + \sigma_h \frac{\phi}{\lambda} - \sigma_a \frac{\phi}{\lambda}} \dots \dots \dots (4)$$

Apabila kehilangan inti target dan penyusutan (burn-out) inti hasil reaksi yang disebabkan penyerapan neutron dapat diabaikan, maka ketidak-saturasi S pada persamaan (4) akan dapat disederhanakan menjadi :

$$S = (1 - e^{-\lambda t_i}) \dots \dots \dots (5)$$

Di sini S akan mendekati nilai 1 bila waktu iradiasi t_i tak berhingga. Dalam keadaan ini laju reaksi sama dengan aktivitas saturasi perinti. Sebaliknya, untuk waktu iradiasi yang pendek yang mengakibatkan $S \ll 1$. Fluks neutron ditentukan dari hasil aktivitas saturasi keping tersebut dengan rumusan :

$$\phi = R / \sigma_{act} \dots \dots \dots (6)$$

R adalah aktivitas saturasi per inti keping yang besarnya :

$$R = \frac{BA}{mN_o} \frac{X_A}{\eta \epsilon} \frac{\lambda t_c e^{\lambda t_c}}{(1 - e^{-\lambda t_c}) (1 - e^{-\lambda t_i})} P \dots \dots \dots (7)$$

- dengan :
- BA = berat atom inti target,
 - m = massa keping,
 - N_o = bilangan Avogadro = 6.022 x 10²³,
 - X_A = luas puncak gamma total yang dipancarkan isotop,
 - P = faktor normalisasi daya reaktor.

II.2. Metoda pengaturan spektrum^{3,4,5)}

Di dalam pengaturan spektrum (dahulu dikenal sebagai metoda unfolding) biasanya digunakan metoda minimisasi deviasi relatif (RDM = relative deviation minimization) dan metoda iteratif. Pada makalah ini akan sedikit digambarkan mengenai metoda iteratif karena metoda tersebut yang digunakan pada paket program SAND-II. Prosedur perhitungan di dalam metoda iteratif terdiri dari spektrum pendekatan awal dan iterasi dari pendekatan tersebut hingga ke suatu bentuk spektrum yang memenuhi kriteria terhentinya iterasi.

Misalkan f(E) dan f^k(E) masing-masing adalah spektrum neutron yang tidak diketahui dan spektrum hasil iterasi yang ke-k, maka aktivitas keping yang ke-i secara perhitungan pada langkah iterasi yang sama diberikan dengan persamaan:

$$A_{ij}^k = \sigma_{ij} \int_{E_j} \phi^k(E) dE = \sigma_{ij} \phi_j^k \dots \dots \dots (8)$$

Di sini didefinisikan faktor pembobot W^k_{ij} sebagai berikut :

$$W_{ij}^k = \frac{A_{ij}^k}{A_i^k} \left[\frac{1}{(\delta A_i)^2} \times \frac{1}{(\delta \sigma_{ij})^2} \right] \dots \dots \dots (9)$$

dengan δA_i adalah standar deviasi relatif terukur aktivitas keping yang ke-i dan δσ_{ij} adalah standar deviasi tampang lintang keping yang ke-i dalam kelompok energi yang ke-j.

Aktivitas total dari keping yang ke-i dapat ditulis sebagai penjumlahan aktivitas pada seluruh kelompok energi :

$$A_i^k = \sum_j A_{ij}^k \dots \dots \dots (10)$$

kemudian didefinisikan C_j^k sebagai berikut bila A_i^m menggambarkan aktivitas saturasi terukur dari keping yang ke-i :

$$C_j^k = \frac{\sum W_{ij}^k \ln(A_i^m / A_i^k)}{\sum W_{ij}^k} \dots \dots \dots (11)$$

maka dengan menggunakan C_j^k dari persamaan (11), dari definisi di atas fluks neutron pada iterasi yang berikutnya dapat dihitung sebagai :

$$\phi_j^{k+1}(E) = \phi_j^k e^{C_j^k} \dots \dots \dots (12)$$

Selanjutnya pengulangan kembali ke persamaan (8) dilakukan hingga dicapai kriteria yang menghentikan iterasi. Salah satu kriteria yang menghentikan iterasi diantaranya adalah bila standar deviasi telah mencapai nilai tertentu; standar deviasi tersebut ditentukan sebagai :

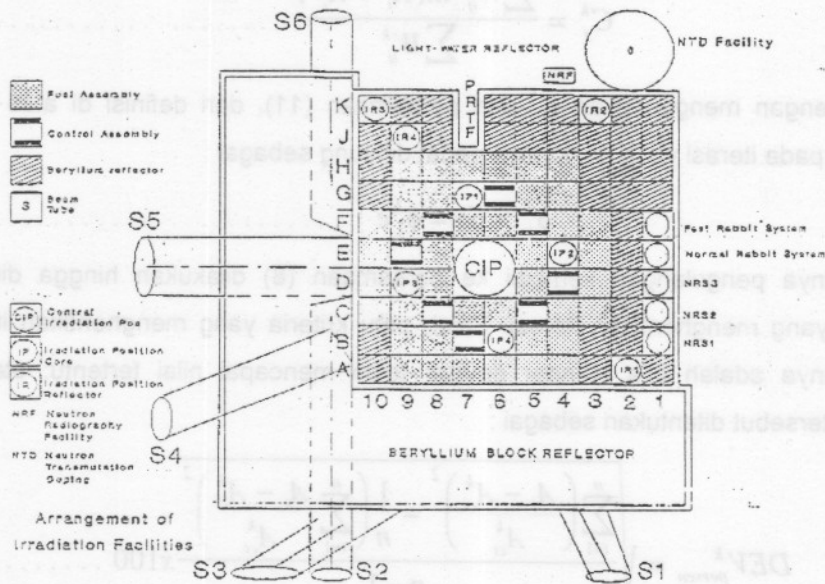
$$DEV_{persen}^k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i - A_{ci}^k}{A_{ci}^k} \right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{A_i - A_{ci}^k}{A_{ci}^k} \right)^2}{n-1}} \times 100 \dots \dots \dots (13)$$

dengan A_{ci}^k merupakan aktivitas perhitungan keping yang ke-i pada iterasi yang ke-k.

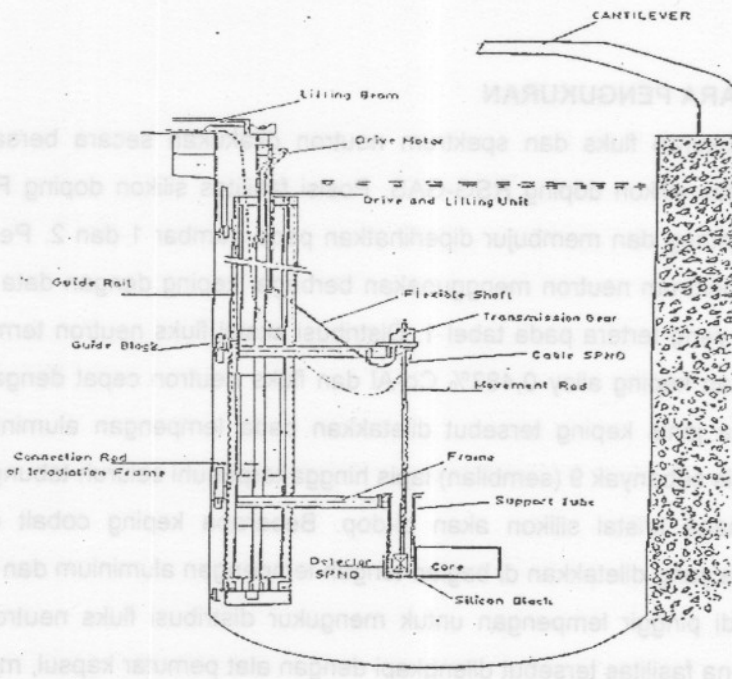
III. TATA CARA PENGUKURAN

Pengukuran fluks dan spektrum neutron dilakukan secara bersamaan di dalam fasilitas silikon doping RSG-GAS. Posisi fasilitas silikon doping RSG-GAS secara melintang dan membujur diperlihatkan pada gambar 1 dan 2. Pengukuran fluks dan spektrum neutron menggunakan berbagai keping dengan data geometri dan massa yang tertera pada tabel 1. Distribusi aksial fluks neutron termal diukur menggunakan keping alloy 0,483% Co-Al dan fluks neutron cepat dengan keping nikel. Kedua jenis keping tersebut diletakkan pada lempengan aluminium yang berlapis-lapis sebanyak 9 (sembilan) lapis hingga terpenuhi seluruh tabung (kapsul) tempat dimana kristal silikon akan di-dop. Beberapa keping cobalt dan nikel tersebut ada yang diletakkan di bagian tengah lempengan aluminium dan ada yang diletakkan di pinggir lempengan untuk mengukur distribusi fluks neutron secara radial. Karena fasilitas tersebut dilengkapi dengan alat pemutar kapsul, maka untuk posisi bagian pinggir dapat dianggap paparan fluks neutronnya merata. Pada lempengan aluminium di lapisan bagian tengah diletakkan sebanyak 15 jenis keping. Dari 15 buah keping tersebut, 9 buah keping diantaranya diperuntukkan mengukur neutron termal dan epitermal, yang terdiri dari 6 buah keping yang

terbuka dan 3 buah yang dibungkus dengan cadmium. Laju reaksi yang diperoleh dari keping-keping tersebut sebanyak 17 jenis reaksi yang digolongkan menjadi empat kelompok jenis reaksi yaitu (n,g), (n,p), (n,n'), dan (n,a).



Gambar 1. Konfigurasi teras beserta fasilitas iradiasi RSG-GAS



Gambar 2. Fasilitas silikon doping di teras RSG-GAS

Langkah-langkah dalam proses iradiasi keping dimulai dari mengidentifikasi keping-keping dan meletakkannya di dalam lempengan aluminium yang kemudian dimasukkan ke dalam kapsul dan selanjutnya kapsul tersebut di masukkan ke dalam fasilitas iradiasi silikon doping. Setelah pemasukkan kapsul pada tempatnya, reaktor dioperasikan pada daya 12 MW dan dibiarkan daya stabil selama 10 jam. Setelah itu reaktor dimatikan dan kapsul dikeluarkan dari tempatnya setelah menunggu beberapa jam (sesuai ketentuan). Keping-keping yang telah diiradiasi dikeluarkan dari kapsul kemudian diukur aktivitasnya.

Peralatan yang digunakan dalam pengukuran aktivitas keping-keping tersebut adalah detektor germanium yang berkemurnian tinggi (HPGe) dan sistem analisator saluran banyak (sistem MCA) dengan perangkat lunak Spektran-AT. Karena metoda pengukuran aktivitas keping ini dengan metoda relatif, maka digunakan beberapa isotop sumber standar untuk mengkalibrasi sistem peralatan pencacahan radiasi gamma. Setelah sistem peralatan pencacahan tersebut dikalibrasi, maka pencacahan keping yang telah diiradiasi dilakukan satu per satu dan ditentukan aktivitas jenuh per intinya.

Tabel 1. Data geometri dan massa keping yang digunakan dalam pengukuran fluks dan spektrum neutron

No.	Jenis Keping	Tebal (mm)	Diameter (mm)	Massa (gram)	Kemurnian (%)
1.	Co-Al (b)	0,1270	12,7	0,0437	0,483
2.	Cu-Mn (b)	0,0508	12,7	0,0500	18,7
3.	Cu (b)	0,2540	12,7	0,2901	99,9928
4.	Au (b)	0,0254	12,7	0,0704	99,99
5.	Sc (b)	0,1270	12,7	0,0495	99,88
6.	Au (Cd)	0,0254	12,7	0,0717	99,99
7.	Ag (b)	0,1270	12,7	0,1669	99,996
8.	Cu (Cd)	0,2540	12,7	0,2895	99,9928
9.	Sc (Cd)	0,1270	12,7	0,0537	99,88
10.	Fe (b)	0,1270	12,7	0,1287	99,99334
11.	Ti (b)	0,2540	12,7	0,1418	99,6345
12.	Ni (b)	0,2540	12,7	0,2850	99,981
13.	Mg (b)	0,1270	12,7	0,0300	99,781
14.	Al (b)	0,1270	12,7	0,2702	99,9923
15.	Nb (b)	0,2540	12,7	0,2745	99,9297

Keterangan : (b) = keping dalam keadaan terbuka,
(Cd) = keping dibungkus dengan cadmium.

Besarnya fluks neutron termal dan neutron cepat dapat ditentukan secara langsung dengan menggunakan rumusan persamaan (6) berdasarkan hasil pengukuran aktivitas jenuh tiap-tiap keping yang diberikan dengan persamaan (7). Sedangkan spektrum neutron ditentukan berdasarkan aktivitas saturasi per inti yang

diperoleh dari berbagai keping dan spektrum awal hasil perhitungan teoritis yang keduanya menjadi masukan paket program pengaturan spektrum SAND-II. Program ini memodifikasi spektrum awal secara iterasi hingga diperoleh solusi yang memadai setelah tercapai suatu kriteria terhentinya iterasi. Kriteria terhentinya iterasi antara lain adalah bila jumlah iterasinya telah tercapai atau standar deviasi pada persamaan (13) telah mencapai nilai sekitar 1%.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

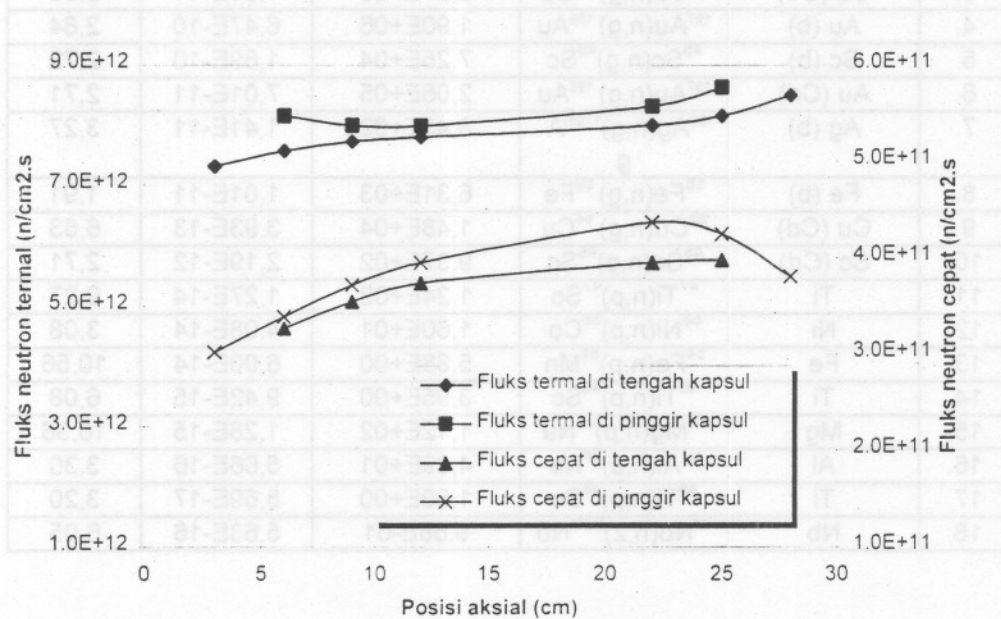
IV.1. Distribusi fluks neutron

Hasil pengukuran distribusi aksial fluks neutron termal dan neutron cepat dapat dilihat pada tabel 2 dan digambarkan pada gambar 3. Dari tabel dan gambar tersebut menunjukkan bahwa fluks neutron termal merata di bagian pinggir kapsul sebesar $8,26E12$ n/cm^2s dan di bagian tengah sebesar $7,89E12$ n/cm^2s , sedangkan fluks neutron cepat merata di bagian pinggir kapsul sebesar $3,73E11$ n/cm^2s dan di tengah sebesar $3,66E11$ n/cm^2s . Perbedaan fluks neutron di pinggir dan di tengah kapsul kurang dari 5%. Dengan perbedaan yang cukup kecil tersebut dapat dikatakan bahwa distribusi fluks neutron di fasilitas silikon dopping cukup merata. Kemerataan fluks neutron ini sangat menentukan kemerataan dopping kristal silikon sehingga akan diperoleh kualitas semikonduktor silikon yang merata resistansinya.

Tabel 2. Fluks neutron termal dan cepat [$n/cm^2/detik$] di fasilitas silikon dopping RSG-GAS

Posisi aksial (cm) dari bawah kapsul	Posisi radial			
	Tengah kapsul		Pinggir kapsul	
	Fluks termal	Deviasi	Fluks termal	Deviasi
3	$7,32E+12$	2,44		
6	$7,57E+12$	3,45	$8,15E+12$	2,36
9	$7,73E+12$	2,44	$8,00E+12$	3,35
12	$7,80E+12$	3,42	$7,99E+12$	2,38
22	$8,00E+12$	2,40	$8,31E+12$	3,33
25	$8,15E+12$	3,36	$8,63E+12$	2,33
28	$8,50E+12$	2,35		
	Fluks cepat	Deviasi	Fluks cepat	Deviasi
3			$3,02E+11$	3,09
6	$3,27E+11$	3,07	$3,39E+11$	4,36
9	$3,55E+11$	4,35	$3,72E+11$	3,07
12	$3,74E+11$	3,08	$3,95E+11$	4,34
22	$3,95E+11$	4,34	$4,37E+11$	3,06
25	$3,98E+11$	3,06	$4,25E+11$	4,34
28			$3,81E+11$	3,07

Hasil penentuan fluks neutron dari spektrum neutron pada daerah termal ($< 0,55$ eV yaitu energi "cut-off" cadmium) cukup dekat dengan hasil pengukuran fluks neutron termal di atas dengan perbedaan sekitar 15%. Demikian pula untuk fluks neutron cepat (> 1 MeV yaitu energi efektif nikel) berbeda sekitar 16%.



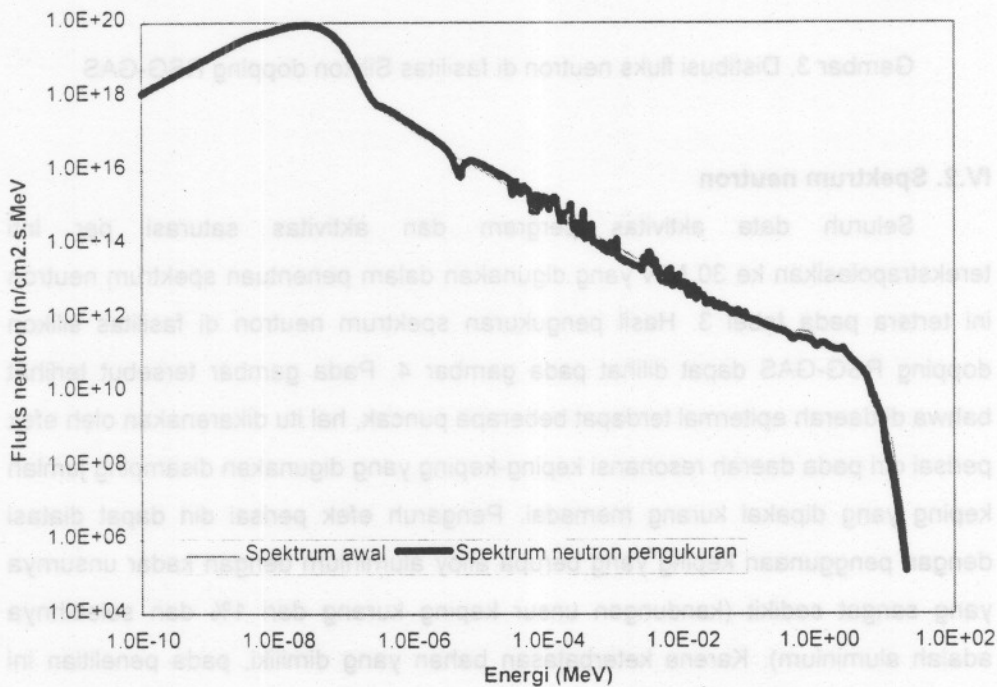
Gambar 3. Distribusi fluks neutron di fasilitas Silikon doping RSG-GAS

IV.2. Spektrum neutron

Seluruh data aktivitas pergram dan aktivitas saturasi per inti terekstrapolasikan ke 30 MW yang digunakan dalam penentuan spektrum neutron ini tertera pada tabel 3. Hasil pengukuran spektrum neutron di fasilitas silikon doping RSG-GAS dapat dilihat pada gambar 4. Pada gambar tersebut terlihat bahwa di daerah epitermal terdapat beberapa puncak, hal itu dikarenakan oleh efek perisai diri pada daerah resonansi keping-keping yang digunakan disamping jumlah keping yang dipakai kurang memadai. Pengaruh efek perisai diri dapat diatasi dengan penggunaan keping yang berupa alloy aluminium dengan kadar unsurnya yang sangat sedikit (kandungan unsur keping kurang dari 1% dan selebihnya adalah aluminium). Karena keterbatasan bahan yang dimiliki, pada penelitian ini untuk sementara efek perisai diri dikoreksi secara perhitungan.

Tabel 3. Aktivitas/gram dan aktivitas/inti terekstrapolasi pada 30 MW keping untuk pengukuran spektrum neutron

No.	Keping	Reaksi	Aktivitas/gram (mCi/gr)	Ao 30MW/inti	Deviasi (%)
1.	Co-Al (b)	$^{59}\text{Co}(n,g)^{60}\text{Co}$	4,32E+03	2,99E-10	2,38
2.	18,7% Cu (b)	$^{63}\text{Cu}(n,g)^{64}\text{Cu}$	7,10E+05	1,88E-11	5,63
3.	Cu (Cd)	$^{63}\text{Cu}(n,g)^{64}\text{Cu}$	6,27E+05	1,66E-11	2,38
4.	Au (b)	$^{197}\text{Au}(n,g)^{198}\text{Au}$	1,90E+06	6,47E-10	2,84
5.	Sc (b)	$^{45}\text{Sc}(n,g)^{46}\text{Sc}$	7,25E+04	1,69E-10	2,72
6.	Au (Cd)	$^{197}\text{Au}(n,g)^{198}\text{Au}$	2,06E+05	7,01E-11	2,71
7.	Ag (b)	$^{109}\text{Ag}(n,g)^{110m}\text{Ag}$	8,43E+02	1,41E-11	3,27
8.	Fe (b)	$^{58}\text{Fe}(n,g)^{59}\text{Fe}$	6,31E+03	1,01E-11	1,91
9.	Cu (Cd)	$^{63}\text{Cu}(n,g)^{64}\text{Cu}$	1,48E+04	3,93E-13	6,53
10.	Sc (Cd)	$^{45}\text{Sc}(n,g)^{46}\text{Sc}$	9,37E+02	2,19E-12	2,71
11.	Ti	$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$	1,24E+02	1,27E-14	9,27
12.	Ni	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	1,60E+01	4,08E-14	3,08
13.	Fe	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	5,88E+00	6,00E-14	10,56
14.	Ti	$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	3,95E+00	9,42E-15	6,08
15.	Mg	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	1,12E+02	1,28E-15	10,36
16.	Al	$^{27}\text{Al}(n,a)^{24}\text{Na}$	4,39E+01	5,66E-16	3,30
17.	Ti	$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	1,50E+00	8,69E-17	3,20
18.	Nb	$^{93}\text{Nb}(n,2)^{92m}\text{Nb}$	9,66E-01	5,63E-16	6,05



Gambar 4. Spektrum neutron di fasilitas Si-dopping RSG-GAS

KESIMPULAN

Fluks dan spektrum neutron di fasilitas silikon doping RSG-GAS telah ditentukan. Hasil pengukuran fluks neutron termal dan neutron cepat rerata di bagian pinggir dan ditengah kapsul berbeda kurang dari 5%, maka dapat dikatakan bawa distribusi fluks neutron di fasilitas silikon dopping cukup merata.

Hasil penentuan fluks neutron yang diperoleh dari pengukuran spektrum neutron (IV.2) pada daerah termal cukup dekat dengan hasil pengukuran fluks neutron termal (IV.1) di atas dengan perbedaan sekitar 15%, demikian pula untuk fluks neutron cepat berbeda sekitar 16%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada semua pihak baik langsung maupun tak langsung atas terselesaikannya makalah ini. Ucapan terima kasih tersebut terutama disampaikan kepada Kepala dan staf bidang Operasi Reaktor dan Balai Keteknikan Iradiasi PRSG khususnya kepada Sdr. Sutrisno dalam proses iradiasi. Dan tentunya juga disampaikan ucapan terima kasih kepada Kepala Bidang dan rekan-rekan di Bidang Fisika Reaktor PRSG khususnya Sdr. Jaka Iman.

DAFTAR PUSTAKA

1. K.H. BECKURTS and K. WIRTZ, "Neutron Physics", Springer Verlag, New York, 1964.
2. IAEA Tech.Rep., Series no. 107, "Neutron Fluence Measurement", 1970.
3. SANG JUN PARK, DENJIRO NEMOTO and FUNIO SASAJIMA, "Measurement of Neutron Spectrum by Activation Detectors", Japan, 1990.
4. M.A. BERZONIS, et all., "Neutron Dosimetry System SAIPS : Manual for users and programers", version 87-02, INDC, IAEA NDS, 1987.
5. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, "RSIC Computer Code Collection SAND II; Neutron Flux Spectra Determination by Multiple foil Activation, Iterative Method", CCC-112 AFWL-TR 67-41, Volume I-IV BNWL-855.

DISKUSI

Pertanyaan : (Yudi)

Alasan digunakannya nikel pada pengukuran fluks neutron ini ?

Jawab : (Amir Hamzah)

Alasan digunakannya nikel pada pengukuran fluks neutron ini adalah :

Cakupan daerah energi tangkapan neutrontya lebih lebar dari keping-keping lain seperti Ti, Mg, Al dan yang lainnya.

Pertanyaan : (Ir. Sri Wardani M.Eng.)

1. Apakah yang dimaksudkan dengan metoda gangguan iteratif ?
2. Alasan-alasan apakah dalam pengukuran fluks neutron termal dan cepat menggunakan keping 0,483% Co-Al dan Ni ?

Jawab : (Amir Hamzah)

1. Metode gangguan iteratif pada penentuan spektrum neutron adalah mengubah bentuk spektrum awal terhadap data aktivitas hasil pengukuran yang dilakukan secara iteratif hingga dicapai kriteria penghentian iterasi.
2. Alasan penggunaan keping-keping tersebut adalah :
 - a) Keping 0,483% Co-Al untuk mengukur fluks neutron termal, karena :
 - i) memiliki karakteristik tampang lintang aktivasi yang besar pada daerah energi termal dan kecil pada daerah energi tinggi,
 - ii) memiliki waktu paruh yang panjang sehingga memperkecil koreksi waktu iradiasi yang cukup lama (12 jam; untuk mendapatkan aktivitas keping yang memadai),
 - iii) kadar Co yang sangat kecil (0,483%) menghindari faktor koreksi perisai diri (self shielding).
 - b. Keping nikel digunakan untuk mengukur neutron cepat, karena :
 - iv) alasannya seperti jawaban untuk Sdr. Yudi.

Pertanyaan : (M. Natsir)

1. Berdasarkan reaksi inti dari semua unsur yang saudara analisa, unsur apakah yang terbesar fluks neutrontya ?
2. Bagaimana pendapat anda dalam hal menentukan besaran (nilai) fluks?

Jawaban : (Amir Hamzah)

1. Tiap-tiap unsur digunakan untuk mengukur daerah energi neutron tertentu sehingga tidak dapat dikatakan unsur tertentu akan mengukur fluks neutron yang lebih besar terhadap unsur yang lainnya. Dalam penentuan spektrum neutron ini digunakan sebanyak mungkin unsur untuk menglingkup (meng-cover) seluruh energi neutron yang terdapat pada tempat yang diukur spektrum neutronnya (pada makalah ini pada posisi fasilitas silikon doping).
2. Dalam hal pengukuran fluks neutron hendaklah kita definisikan rentang energi yang diukur fluks neutronnya.

ABSTRACT

DESIGN OF GAS SAMPLING AND DETECTION OF CYRANO CAPSULE Based on the requirement of safety system of the fuel pin irradiation rig (Cyrano capsule) and to assure operator personnel and equipment safety on surrounding area of the cyrano capsule operation panel in reactor building an installation design of gas sampling and detection has been done. The installation of gas sampling and analysis of cyrano capsule is an auxiliary system of the cyrano capsule mentioned above. By the designed installation the condition of gas pressure on the NAK fluid can be detected. The proposed design incorporates small tube of stainless steel 304 material with 7500 mm length, 3.175 mm diameter and 1.25 mm thickness and it will be used for gas transportation.

I. PENDAHULUAN

Berdasarkan kontrak Engineering and safety laboratory antara Republik Indonesia (BATAN) dengan ANSALDO dengan ANSALDO tangkaiannya penemuan dan pendeteksi gas kapsul cyrano liok termasuk skop ANSALDO sebagai pemasok peralatan untuk BATAN. Tangkaiannya meliputi di pusat cuplikan bahan bakar reaktor daya pada fasilitas uji kapsul cyrano (2537°C) meminimalkan kekhawatiran akan terjadinya pelepasan kelonggong cuplikan bahan bakar tersebut. Hal ini dapat terjadi bila sistem pendingin fasilitas tersebut mengalami kegagalan berupa penurunan permukaan media pendingin (NAK) sehingga memungkinkan terjadinya kontak langsung antara pellet UO₂ dengan kelonggong