

PENGUKURAN DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON CEPAT DARI GENERATOR NEUTRON BUATAN PPNY - BATAN YOGYAKARTA

Sri Sulamdari, Sudjatmoko, Hermono

Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PENGUKURAN DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON CEPAT DARI GENERATOR NEUTRON BUATAN PPNY - BATAN YOGYAKARTA. Generator neutron merupakan salah satu jenis dari akselerator partikel yang bertenaga rendah, yang dapat menghasilkan neutron cepat bertenaga 14 MeV dari reaksi $H^3(d,n)He^4$. Dalam makalah ini dibahas pengukuran fluks neutron dengan metode aktivasi dan metode pengukuran langsung. Pengambilan data, dilakukan dengan perubahan jarak dan sudut. Pengukuran dengan metode aktivasi, dilakukan dengan menggunakan keping detektor ambang, yaitu keping Al. Dari hasil pencacahan, didapatkan besarnya fluks neutron. Pada pengukuran secara langsung terdapat tiga cara, yaitu dengan mengukur besarnya arus deuteron, kemudian dengan survey meter yang hasilnya dapat dibaca secara langsung dan yang terakhir adalah dengan membandingkan dengan fluks pada titik sumber. Dari ketiga bentuk pengukuran secara langsung maupun dengan metode aktivasi, dapat dilihat distribusi fluks neutron sebagai fungsi dari sudut dan jarak dalam bentuk tabel-tabel dan grafik. Hasil perhitungan fluks neutron cepat dengan cara aktivasi dalam posisi keping Al menempel pada sasaran tritium adalah $(9,57 \pm 0,49) 10^6$ n/cm² dt. Didapatkan bahwa fluks neutron cepat dari pengukuran dengan diukur besarnya arus deuteron lebih besar terhadap pengukuran dengan metode aktivasi, dengan survey meter maupun dengan membandingkan fluks pada titik sumber. Diberikan pula alasan-alasan dari hasil tersebut. Sedang bahaya radiasi untuk neutron cepat pada ruang pengendali dan sekitarnya cukup aman.

ABSTRACT

FAST NEUTRON FLUX DISTRIBUTION MEASUREMENT FROM NEUTRON GENERATOR OF YOGYAKARTA NUCLEAR RESEARCH CENTRE - NATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Neutron generator is a kind of low energy particle accelerator which is produced fast neutron with energy 14 MeV based on $^3H(d,n)^4He$ reaction. This paper discussed fast neutron flux distribution with activation and direct methods. The data is taken with various distances and angles. Measurement with activation metode done using aluminium foil. There are three methodes for direct measurement. The deuteron flows measurement, using survey meter and comparing with flux of the point source. From the measurement using all activation methode and direct methodes mentioned above shows the flux as a function of angles and distance in the tables and graphs. The fast neutron flux calculation using activation methode with aluminium position stick right at the tritium target is $(9.57 \pm 0.49) 10^6$ n/cm² sec. Also obtained that deuteron flows measurement method gave flux fast neutron higher then using activation methode, survey meter methode or comparing flux for point source. The reasons of that comparisson discussed in this paper, and the result fast neutron radiation at the control and surrounded room is save enough.

PENDAHULUAN

Generator neutron merupakan salah satu jenis dari akselerator partikel yang bertenaga rendah, yang dapat menghasilkan neutron cepat bertenaga 14 MeV dan fluks sebesar 10^7 n/cm²dt sampai 10^8 n/cm²dt. Agar dapat dihasilkan neutron, partikel-partikel dari sumber ion dipercepat dengan tenaga tertentu, dan kemudian ditembakkan pada suatu sasaran yang dapat menghasilkan neutron cepat. Dengan menggunakan reaksi $^3H(d,n)He^4$ dan tenaga

110 keV, maka dapat dihasilkan neutron energi tunggal sebesar 14 MeV. Dengan tenaga sebesar itu, hampir semua bahan dapat diaktivasi.

Dalam makalah ini dibahas pengukuran fluks neutron dengan metode aktivasi dan pengukuran langsung. Pengambilan data, dilakukan dengan perubahan jarak dan sudut. Masalah lain yang juga penting adalah perhitungan seberapa jauh bahaya neutron cepat sampai ke ruang pengendali dan sekitarnya.

Pengukuran dengan metode aktivasi juga dilakukan dengan menggunakan keping detektor ambang, yaitu keping Al yang dapat beraksi dengan neutron jika neutron mempunyai tenaga yang lebih besar dari tenaga ambang. Hasil aktivasi pada keping dapat menghasilkan sinyal yang dapat dicacah dengan Multichannel Analyzer. Dari hasil pencacahan, didapatkan besarnya fluks neutron.

Pada pengukuran secara langsung terdapat tiga cara, yaitu dengan mengukur besarnya arus deuteron, kemudian dengan survey meter yang hasilnya dapat dibaca secara langsung dan yang terakhir adalah membandingkan dengan fluks pada titik sumber.

Dari ketiga bentuk pengukuran secara langsung maupun dengan metode aktivasi, dapat dilihat distribusi fluks neutron sebagai fungsi sudut dan jarak dalam bentuk tabel-tabel dan grafik.

Hasil perhitungan fluks neutron cepat dengan cara aktivasi dalam posisi keping Al menempel pada sasaran tritium adalah $(9,57 \pm 0,49) 10^6$ n/cm² dt.

Didapatkan bahwa fluks neutron cepat dari pengukuran dengan diukur besarnya arus deuteron lebih besar terhadap pengukuran dengan metode aktivasi, dengan survey meter maupun membandingkan dengan fluks pada titik sumber. Diberikan pula alasan-alasan dari hasil tersebut.

TEORI

Interaksi Neutron dengan Inti

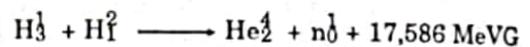
Neutron merupakan bagian dari inti yang tidak bermuatan listrik. Karena salah satu sifat tersebut, neutron tidak terpengaruh oleh medan listrik maupun medan magnet. Selain itu, interaksi neutron dengan inti dapat berlangsung secara efektif, karena neutron tidak terpengaruh oleh potensial Coulomb.

Interaksi antara neutron dengan inti atom secara umum reaksinya dapat ditulis:



atau dapat ditulis dalam notasi $X(a,b)Y$. Jika setelah bereaksi partikel a dan b sama, peristiwanya disebut hamburan. Untuk Y dalam keadaan dasar (ground state), reaksinya adalah hamburan elastis. Bila Y dalam keadaan tereksitasi (Y^*), disebut hamburan tidak elastis. Dan bila inti hasil reaksi, yaitu Y atau Y^* hampir sama, maka reaksinya disebut dengan pembelahan.

Neutron bisa dihasilkan dari reaksi inti dengan menggunakan generator neutron (akselerator), maupun dari hasil pembelahan inti. Generator neutron merupakan salah satu akselerator yang dapat menghasilkan neutron cepat. Dengan generator neutron, dapat diperoleh neutron cepat dari hasil reaksi (d,n). Contoh reaksinya: $H_1^3(d,n)He_2^4$ dan $H_1^2(d,n)He_2^4$ yang terjadi akibat tumbukan partikel-partikel yang dipercepat, dan ditembakkan pada inti sasaran. Dengan diadakan pemilihan reaksi inti yang dipergunakan, maka dapat dihasilkan neutron yang tenaganya dapat diatur sesuai dengan yang dikehendaki. Agar tenaga neutron yang dihasilkan cukup besar dengan daya masukan yang relatif kecil, dipergunakan reaksi $H_1^3(d,n)He_2^4$ atau dapat ditulis:



Keuntungan lain memakai reaksi tersebut, karena sumber neutron yang dihasilkan mempunyai beberapa sifat yang menguntungkan, diantaranya yaitu fluks yang cukup tinggi dan tenaganya monokromatis.

Karena kecepatan reaksi serta fluks neutron tidak hanya bergantung pada tenaga yang dihasilkan, maka faktor tampang lintang reaksi perlu diperhatikan pula. Tampang lintang reaksi dari $H_1^3(d,n)He_2^4$ akan diperoleh optimumnya pada tenaga deuteron sekitar 110 keV¹.

Supaya inti dapat bereaksi, diperlukan suatu tenaga E_{th} , yaitu tenaga terendah dari partikel penembak yang dapat memulai terjadinya reaksi inti.

Pengukuran Distribusi Fluks Neutron Cepat

Terdapat dua cara untuk menentukan fluks neutron cepat yang dihasilkan dari reaksi inti $H_1^3(d,n)He_2^4$, yaitu dengan metode aktivasi yang mempergunakan keping sasaran Al atau detektor ambang, dan secara pengukuran langsung, yaitu dengan mengukur besarnya arus deuteron, tampang lintang, dan jumlah atom sasaran (tritium).

Metode Aktivasi

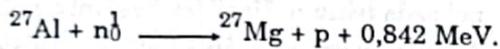
Hal ini akan bisa dilakukan hanya untuk tenaga neutron di atas tenaga ambang E_{th} . Pada metode ini, dipilih keping detektor ambang aluminium. Pemilihan ini berdasarkan pada umur paruh yang relatif singkat, tampang lintang yang cukup besar, dan kelimpahan atom yang tinggi, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data nuklir untuk reaksi neutron 14,7 MeV dengan Al(1)

Reaksi	Kelimpahan %	Tampang lintang (mbarn)	Waktu paruh (mnt)	Tenaga (MeV)	Intensitas (%)	Efisiensi (%)
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)\text{Na}^{24}$	100	120	900	1,37	100	30
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)\text{Na}^{24}$	100	120	900	2,75	100	24
$^{27}\text{Al}(n,\gamma)\text{Al}^{28}$	100	0,5	2,3	1,78	100	27
$^{27}\text{Al}(n,p)\text{Mg}^{27}$	100	81	9,5	0,84	70	34
$^{27}\text{Al}(n,p)\text{Mg}^{27}$	100	81	1,01	30	30	32

Dari hasil reaksi neutron dengan Al seperti pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa bila Al menangkap neutron cepat, akan meluruh dengan umur paruh tertentu menjadi unsur yang stabil dengan memancarkan sinar α , β , maupun proton. Dengan mengambil sinar γ sebagai hasil reaksi yang dipancarkan saat peluruhan, maka dengan bantuan detektor Ge(Li), sinar γ dapat dicacah untuk menentukan jumlah cacah perdetik.

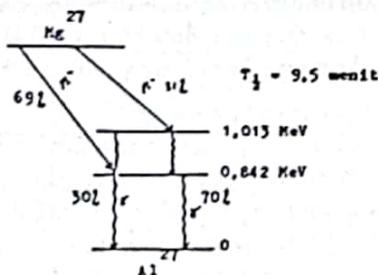
Untuk nuklida yang terbentuk dari hasil reaksi $^{27}\text{Al}(n,p)\text{Mg}^{27}$, dapat dituliskan



Adapun fluks neutron di atas tenaga ambang E_s dapat dinyatakan [2]:

$$Q(E_n > E_s) = \frac{\lambda(C-B)}{N_T \lambda t_0 \epsilon (1 - e^{-\lambda t_0}) (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})} \quad (1)$$

C = jumlah cacah total per menit; B = cacah latar belakang; ϵ = efisiensi detektor; λ = konstanta peluruhan; t_0 = lamanya waktu iradiasi; t_1 = interval waktu antara berakhirnya iradiasi dan dimulainya pencacahan; t_2 = interval waktu antara berakhirnya iradiasinya dan berakhirnya pencacahan; N_T = jumlah total dari atom detektor ambang; σ =ampang lintang aktivitas. Skema peluruhannya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema peluruhan dari reaksi $^{27}\text{Al}(n,p)\text{Mg}^{27}$

Metode Pengukuran Secara Langsung

Pada metode pengukuran secara langsung ini, perlu diketahui besaran-besaran yang pokok, yaitu tampang lintang, berkas arus deuteron dan jumlah inti atom sasaran yang akan menghasilkan neutron (tritium). Variabel-variabel tersebut akan sebanding dengan fluks neutron yang datang. Bila dilihat dari materi sasaran dengan luas A, tebal x dan massa jenis P, maka jumlah atomnya: $N = (\rho x) Na/A$; $dN = (\rho dx) Na/A$.

Kecepatan reaksi inti dapat dinyatakan: $F = dn/dt = \sigma N \phi$; $dF = I (\rho dx) Na \tau/A$.

dx = tebal sasaran (cm); F = kecepatan reaksi (neutron/detik); σ = luas tampang lintang (cm^2); N = jumlah atom tiap satuan luas (atom/ cm^2); ϕ = jumlah deuteron yang lewat tiap detik (det/det).

Bila tebal sasaran dianggap tipis, sehingga selisih antara tenaga partikel yang datang E_b dan tenaga setelah melewati sasaran E_a sangat kecil, yang mengakibatkan tampang lintang diferensial sebagai fungsi E_k tetap. Maka jumlah neutron yang lewat tiap satuan luas tiap detik dengan sudut tetap adalah [3]: $\Phi_E(E_k, R, \theta_0,$

$$\varphi_0) = \frac{I x_0 \rho Na d \sigma (E_k \theta_0 \varphi_0)}{ze R^2 A d \Omega} \quad (2)$$

Besarnya $hargad \sigma (E_k, \theta_0, \varphi_0) d \Omega$ dapat dicari dari grafik.

Paparan Radiasi

Dosis maksimum yang boleh diterima dari pekerja radiasi tidak boleh melebihi lebih besar dari 5 rem tiap tahun atau 2,5 mrem tiap jam. Untuk anggota masyarakat, dosisnya tidak boleh 0,5 rem tiap tahun. Untuk menentukan dosis akumulasi maksimum untuk orang dengan umur N tahun, maka rumus yang berlaku dalam dosis tertinggi adalah: $D = 5 (N - 18)$ rem. D = dosis tertinggi dari hasil sinar X dalam rem; N = usia pekerja dalam tahun. Fluks neutron cepat dalam laju dosis sesuai dengan persamaan 3 [6], dapat dinyatakan: $P (\text{rad}/dt) =$

$$\frac{\sum_i 1,6 \cdot 10^{-6} \Phi(E_i) E_i \sigma_k(E_i) \Omega_k N_k}{100} \quad (3)$$

Dari harga $\sum N \sigma = 0,0239$ dan dengan mengambil fluks sebesar 1 neutron tiap satuan luas detik, harga laju dosis menjadi:

$$P = \frac{1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 14,7 \text{ MeV} \cdot 0,0239}{100} = 5,62 \cdot 10^{-9} \text{ rad/det}$$

Besarnya dosis ekivalen yang berhubungan dengan laju dosis adalah [6]: $DE = P \times RBE = P \times DF \times QF$ (4)

Harga $DF = 1$ jika perkenaan radiasinya ke seluruh tubuh, sedang harga $QF = 6,5$ untuk tenaga neutron cepat 14,7 MeV. Sehingga besarnya dosis ekivalen adalah: $DE = P \times 6,5 = 0,1313 \text{ mrem/jam}$

METODE PENGUKURAN

Perisai Neutron

Ruang pengendali dan ruang-ruang lainnya di sekitar generator neutron biasanya cukup dekat. Untuk itu diperlukan perisai neutron yang dapat mereduksi neutron hingga dosisnya tidak melebihi batas maksimum yang diizinkan. Selain itu, pemasangan perisai diharapkan dapat mengurangi adanya bahaya radiasi sinar γ , kontaminasi dari tritium yang terlepas, maupun dari isotop-isotop radioaktif sisa. Harga fluks neutron setelah melewati suatu jarak tertentu, akan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. Besar fluks neutron tersebut dapat dituliskan [5]: $\phi_1 = \phi_0 / r^2$ (5)

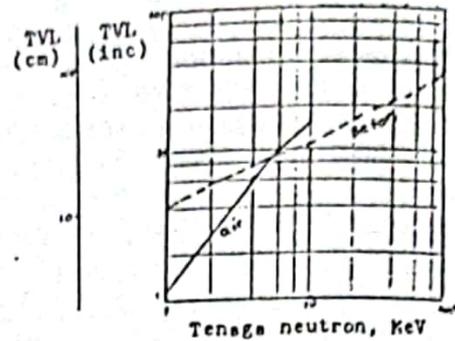
ϕ_0 = fluks neutron yang berasal dari sumber neutron; r = jarak sumber neutron terhadap detektor.

Karena adanya penyerapan oleh perisai neutron, maka fluks neutron setelah melewati perisai neutron menjadi tereduksi. Besar fluks neutron setelah melalui perisai setebal x adalah [6]: $\phi_2 = \phi_1 \cdot 10^{-x/TVL}$ (6).

TVL (Tenth Value Layers) adalah tebal perisai yang dapat mereduksi fluks neutron hingga menjadi sepersepuluh dari fluks mula-mula. Harga TVL untuk beton sebagai fungsi tenaga neutron, dapat dilihat pada Gambar 2.

Pengukuran Fluks Neutron Cepat

Pengukuran fluks neutron dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan metode aktivasi dan dengan metode pengukuran langsung. Supaya hasil kedua metode pengukuran dapat diperbandingkan, maka berkas arus deutron, tegangan tinggi, kevakuman, serta variabel-



Gambar 2. Harga TVL sebagai fungsi tenaga neutron untuk air dan beton

variabel yang lain yang berasal dari generator neutron, dibuat sama. Pada metode aktivasi, pengukuran yang dilakukan masih dibantu dengan detektor Ge(Li) dan Multichannel Analyzer, sedang untuk metode pengukuran secara langsung, dilakukan dengan alat survey meter. Sebagai fluks standar dipakai keping detektor neutron yang diaktivasi dengan posisi menempel pada tritium. Hasil iradiasi ini dipakai sebagai fluks acuan pada titik sumber neutron untuk kedua metode pengukuran tersebut. Data operasi generator neutron: tegangan pemercepat 90 kV; tegangan ekstraktor 4 kV; tegangan pemfokus 9kV; arus ion deutron 180 μA ; kehampaan $2 \cdot 10^{-5}$ Torr.

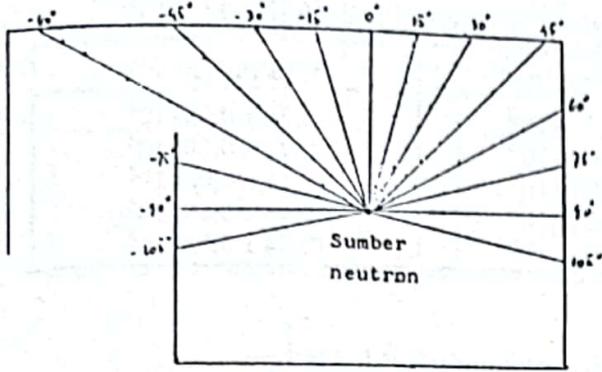
Metode Aktivasi

Dalam percobaan, keping detektor (Al) ditempatkan pada jarak (menempel dan 4 cm) dari sumber neutron. Dan pada pengukuran langsung jaraknya diubah setiap 50 cm ke belakang, sampai di balik perisai. Demikian pula dengan perubahan sudut, dimana keping diletakkan 0° , kemudian digeser tiap 15° ke arah kanan dan ke arah kiri, seperti pada Gambar 3.

Sebelum dilakukan pencacahan dengan detektor Ge(Li), baik dari pengukuran fluks standar maupun dengan metode aktivasi, dilakukan kalibrasi tenaga pada detektor Ge(Li) dengan menggunakan sumber sinar γ , yaitu ^{152}Eu .

Metode Pengukuran Langsung

Untuk metode pengukuran langsung, hasil pengukuran fluks neutron cepat dapat dibaca secara langsung (ϕ_n). Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan survey meter. Survey meter yang digunakan adalah PUG-1 N/S 03324, dan jenis detektornya adalah sintilasi neutron cepat PNS 19. Pengukuran yang dilakukan, sama dengan cara metode aktivasi yaitu sebagai



Gambar 3. Pengukuran fluks neutron cepat sebagai fungsi jarak dan sudut

fungsi jarak dan sudut. Mengingat bahaya radiasi dari generator neutron, maka pengukuran fluks neutron cepat dapat dilakukan dengan meletakkan detektor dekat dengan sumber neutron, sedang pembacaan meternya dilakukan dari ruang pengendali.

Gambaran Umum Generator Neutron

Salah satu jenis akselerator tenaga rendah yang menghasilkan neutron cepat di PPTN-BATAN adalah generator neutron. Bagian utama dari akselerator adalah: sumber ion, sumber tegangan tinggi, tabung akselerator, sistem lensa dan sistem hampa. Sedang bagian tambahan disebutkan: alat pengendali dari jauh, penarik target, dan lain-lain.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Al Sebagai Fluks Standar

Perhitungan fluks neutron cepat dari Al sebagai fluks standar dalam posisi menempel pada tritium memakai persamaan (1) dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Harga fluks neutron cepat dari Al sebagai fluks standar

No	mAl (gram)	ϕ (n/cm ² menit)	ϕ (n/cm ² menit)
1.	0,972	$(1,18 \pm 0,08) 10^7$	$(1,97 \pm 0,01) 10^5$
2.	0,9742	$(5,74 \pm 0,29) 10^7$	$(9,57 \pm 0,49) 10^5$

Keterangan:

Fluks pertama dipakai sebagai fluks standar metode pengukuran secara langsung, sedang yang kedua untuk metode aktivasi.

Perhitungan Fluks Neutron dengan Metode Aktivasi

Posisi keping diletakkan pada jarak 4 cm dari tritium. Sedang rumus yang dipakai sama

dengan rumus pada fluks standar dan harga-harga neutron hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3.

Perhitungan Pengukuran Secara Langsung

Hasil perhitungan pengukuran secara langsung yaitu: besar fluks neutron dengan pengukuran arus ϕ_E , besar fluks neutron dengan pembandingan fluks standar ϕ_I , dan besar fluks neutron dengan pengukuran dengan survey meter ϕ_n dapat dilihat pada Gambar 4.

Kurva antara fluks neutron cepat terhadap sudut dapat dilihat pada Gambar 5-8.

Besar fluks neutron cepat dari pengukuran secara langsung dalam dosis ekuivalen dapat dilihat pada Tabel 4.

Perbandingan Fluks Neutron Cepat Antara Metode Aktivasi dan Pengukuran Secara Langsung

Karena fluks standar dari kedua metode tidak sama, maka diperlukan koreksi sebesar:

$$K_f = \phi_B / \phi_A = 9,57 \cdot 10^5 / 1,97 \cdot 10^5 = 4,46$$

Perbandingan kedua metode tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.

Dalam pengambilan data dengan survey meter, jarak yang diambil paling kecil adalah 50 cm, mengingat generator neutron merupakan alat yang memakai tegangan tinggi. Sedang jarak maksimumnya adalah 350 cm. Pengambilan data untuk tiap jarak adalah empat kali.

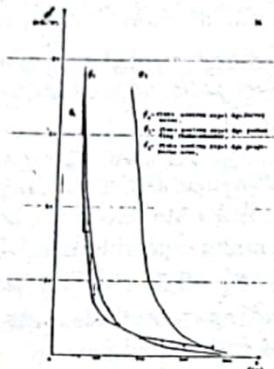
Pada metode aktivasi, jarak yang diambil hanya satu kali, yaitu 4 cm dengan variasi sudut -60°, -30°, 0°, 30°, dan 60°. Hal ini dilakukan, karena untuk pengukuran di atas jarak 4 cm, diperlukan waktu aktivasi yang lama, sedangkan generator neutron yang ada di BATAN hanya mampu mengaktivasi sekitar 20 menit untuk setiap kali aktivasi.

Besarnya fluks neutron cepat pada pengukuran secara langsung (survey meter) didapat harga terbesar pada sudut 0°. Meskipun demi-

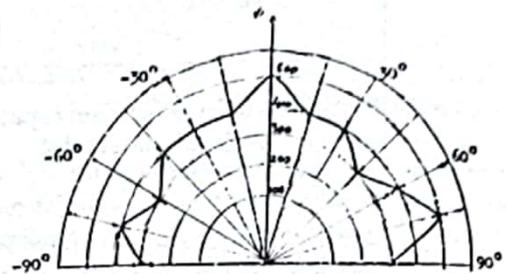
kian, secara umum dapat dikatakan bahwa besarnya fluks neutron cepat adalah relatif sama, baik pada pengukuran dengan metode aktivasi, maupun dengan pengukuran secara langsung

Tabel 3. Besarnya fluks neutron dengan memakai metode aktivasi

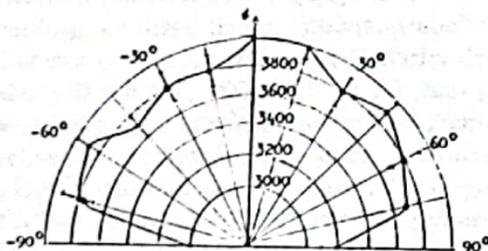
(°)	mAl (gram)	ϕ , (n/cm ² menit)	ϕ , (n/cm ² menit)
-60	0,9849	$(1,39 \pm 0,071) 10^6$	$(2,33 \pm 0,04) 10^4$
-30	0,9743	$(1,75 \pm 0,091) 10^6$	$(2,92 \pm 0,05) 10^4$
0	0,9525	$(1,47 \pm 0,078) 10^6$	$(2,45 \pm 0,03) 10^4$
30	0,9210	$(1,49 \pm 0,077) 10^6$	$(2,48 \pm 0,08) 10^4$
60	0,9255	$(1,40 \pm 0,071) 10^6$	$(2,34 \pm 0,08) 10^4$



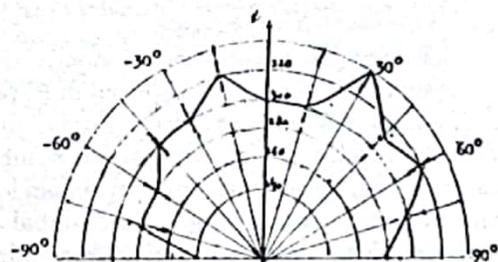
Gambar 4. Kurva perbandingan fluks neutron cepat sebagai fungsi dari jarak secara teori dan secara eksperimen



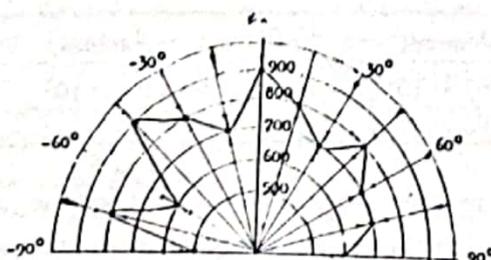
Gambar 7. Kurva fluks neutron dalam n/cm² mnt, sebagai fungsi dari sudut pada jarak 150 cm



Gambar 5. Kurva fluks neutron cepat dalam n/cm² mnt, sebagai fungsi dari sudut pada jarak 50 cm



Gambar 8. Kurva fluks neutron dalam n/cm² mnt, sebagai fungsi dari sudut pada jarak 200 cm



Gambar 6. Kurva fluks neutron cepat dalam n/cm² mnt, sebagai fungsi dari sudut pada jarak 100 cm

untuk tiap sudut pada satu jarak. Hal ini bisa dilihat pada tabel hasil pengukuran dan pada kurva antara fluks neutron cepat sebagai fungsi dari sudut.

Jika dibandingkan antara pengukuran dengan surveymeter ϕ_n dan pengukuran menggunakan titik sumber ϕ_1 pada sudut dan jarak yang sama, akan didapatkan fluks neutron cepat yang mendekati sama. Untuk pengukuran fluks dengan mengukur arusnya ϕ_E dan dibandingkan dengan memakai survey meter ϕ_n , hasilnya cukup jauh. Hal ini disebabkan karena:

1. Generator neutron yang dibuat oleh BATAN hanya mampu menghasilkan tenaga deutron sebesar 90 keV, sedangkan fluks neutron cepat akan berharga optimum jika tenaga deutron yang dihasilkan adalah 110 keV [1].

Tabel 4. Besar fluks neutron cepat dari pengukuran secara langsung dalam dosis ekivalen

R (cm)	ϕ_n (n/cm ² detik)		D (m rem/jam)	
	-60°	0°	-60°	0°
80	18,33 ± 3,18	23,33 ± 3,93	2,41 ± 0,42	3,06 ± 0,52
90	16,67 ± 3,86	16,67 ± 3,86	2,19 ± 0,09	2,19 ± 0,51
100	10,00 ± 3,43	15,00 ± 3,66	1,13 ± 0,06	1,97 ± 0,09

Tabel 5. Perbandingan fluks neutron dari kedua metode

R (cm)	ϕ (n/cm ² detik)	Kf	ϕ_E (n/cm ² detik)	ϕ_1 (n/cm ² detik)
4	(2,45 ± 0,03) 10 ⁴	4,46	(8,12 ± 0,12) 10 ⁸	(5,5 ± 0,15) 10 ⁴

Keterangan:

O_B = Fluks titik sumber dari metode aktivasi

O_A = Fluks titik sumber dari pengukuran secara langsung

- Survey meter yang digunakan menurut buku panduannya mempunyai kesalahan alat sekitar 15%.
- Meskipun hasil perhitungan menyatakan, umur tritium yang tersisa masih cukup besar, tetapi ada kemungkinan tritium yang terlepas, mengingat adanya panas yang tinggi pada waktu bereaksi dengan deuterium. Selain itu, reaksi antara tritium dan deuterium tidak bisamerata karena sasaran tritium tidak dapat berputar.

Besarnya dosis ekivalen minimum sebesar 2,5 mrem tiap jam hanya terdapat pada jarak 90 cm dari sumber neutron. Sedang dosis ekivalen yang ada pada ruang pengendali yang diukur dengan survey meter adalah nol, sehingga dosis ekivalennya tidak terukur karena kecil. Dengan kata lain dalam ruang pengendali cukup aman. Tetapi hal ini bukan berarti meremehkan adanya bahaya radiasi, karena radiasi yang diamati hanya neutron cepat, padahal masih ada bahaya dari sinar γ , isotop-isotop radioaktif maupun kontaminasi akibat kebocoran alat.

DAFTAR PUSTAKA

- Nargolivalla, Sam S., Przybylowicz, E.P., Activation Analysis With Neutron Generator, John Wiley & Sons, New York (1973).
- Price, William, J., Nuclear Radiation Detection, McGraw-Hill Book Company, Inc (1964).
- Bygrave, W.P., Treado and Lambert, J., Accelerator Nuclear Physics. Fundamental Experiments With a Van de Graff Accelerator, High Voltage Corporation, Burlington, Massachusetts 01813, USA (1970).

KESIMPULAN

Pengukuran yang dilakukan dengan metode aktivasi tidak bisa dilakukan perubahan terhadap jarak, tetapi pengukuran dengan metode ini dapat dikatakan paling baik diantara keempat cara yang dilakukan. Pada metode pengukuran secara langsung, banyak mempunyai kelemahan, diantaranya parameter yang diambil kurang mempunyai hubungan langsung dengan fluks neutron, variabelnya dianggap ideal (pada ϕ_E dan ϕ_1), dan alat untuk mendeteksi neutron kurang akurat (pada ϕ_n dengan survey meter).

Diharapkan pengukuran neutron cepat dari generator neutron ini bisa dilakukan dengan mengukur besarnya energinya, sehingga bisa dibandingkan dengan harga fluksnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Disampaikan ucapan terimakasih kepada Saudara Supriyanto, Suradji, Agus Tri Purwanto yang telah membantu selama percobaan berlangsung sampai dengan penyelesaian makalah ini.

4. Badan Tenaga Atom Nasional, Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi, BATAN, Jakarta (1979).
5. Jaeger, R.G., Engineering compendium on radiation shielding, Vol. 1, Sppringer Verlag, New York Inc (1968).
6. Hermono, Beberapa aspek tentang distribusi neutron cepat, FMIPA - ITS Surabaya (1989).