

TEKNIK AKTIVASI FOIL INDIUM UNTUK MENENTUKAN DISTRIBUSI NEUTRON TERMAL DALAM FANTOM PADAT DI BAWAH IRADIASI LINAC 15MV

Risalatul Latifah^a, Johan A.E. Noor^a, Bunawas^b.

^aJurusan Fisika Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya Jalan Veteran Malang

^bPusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, BATAN

Email: risa_latifah@yahoo.com

Diterima editor 22 April 2013

Disetujui untuk publikasi 31 Mei 2013

ABSTRAK

TEKNIK AKTIVASI FOIL INDIUM UNTUK MENENTUKAN DISTRIBUSI NEUTRON TERMAL DALAM FANTOM PADAT DI BAWAH IRADIASI LINAC 15MV. Dewasa ini, penggunaan pesawat linear accelerator (*linac*) untuk kegiatan terapi pada penyakit kanker mulai intensif digunakan. Keuntungan utama linac dibanding dengan pesawat teleterapi adalah tidak lagi menggunakan sumber radioaktif serta memiliki variasi energi sehingga bisa disesuaikan dengan kebutuhan. Ketika sebuah pesawat *linac* dioperasikan di atas 10 MV, maka akan terjadi reaksi fotoneutron (γ, n) hasil dari interaksi energi sinar-X tinggi yang menumbuk material-material penyusun komponen pesawat *linac* seperti target, kolimator dan filter. Reaksi fotoneutron ini akan menghasilkan neutron. Pengukuran fluks neutron sangat penting untuk dilakukan terkait dengan keselamatan pada tindakan radioterapi dikarenakan emisi neutron ini merupakan radiasi sekunder yang akan menaikkan resiko kanker sekunder pada pasien akibat bertambahnya dosis radiasi yang diterima. Studi ini mengevaluasi fluks neutron yang dihasilkan oleh pesawat *linac* 15 MV menggunakan teknik aktivasi foil. Sebanyak 45 foil disisipkan dalam fantom padat yang diradiasi oleh *linac* untuk mengetahui besarnya fluks neutron terhadap fungsi kedalaman. Nilai yang didapat dimaksudkan untuk mengestimasi dosis tambahan untuk pasien ketika menjalani *treatment* menggunakan *linac* pada operasi di atas 10 MV. Dengan menggunakan hasil analisa spektrometer gamma dari foil indium yang teraktivasi, nilai fluks mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya kedalaman sampai pada 7 cm di bawah permukaan dengan nilai $2,6 \times 10^6 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ kemudian terus menurun seiring bertambahnya jarak. Pola ini terjadi karena adanya proses termalisasi neutron. Dengan menggunakan metode faktor konversi dosis neutron termal, maka diketahui dosis tambahan dari fluks neutron maksimum yang diterima pasien adalah 0,86 mSv/menit. Kontribusi dosis ini relatif kecil yaitu sebesar 0,1% dari dosis terapi.

Kata kunci: Fluks neutron termal, LINAC, indium, fantom, aktivasi foil.

ABSTRACT

TECHNIQUE ACTIVATION OF FOIL INDIUM FOR DETERMINING THE DISTRIBUTION NEUTRON THERMAL IN SOLID FANTOM UNDER IRRADIATION LINAC 15MV. Nowadays, using linear accelerator (LINAC) for therapeutic cancer activity intensively use. The advantages of linac compared to teletherapy plane are no longer using radioactive sources and have a variety of energy thus can be adapted to the needs. When a linac is operated above 10 MV, there will be a photoneutron reaction (γ, n) from the interaction of high X-rays energy striking the material components of linac such as target, collimator and filter. Photoneutron reaction will produce neutrons. Measurement of neutron flux is very important to the safety in the radiotherapy due to neutron emission is a secondary radiation that would increase the risk of secondary cancers in patients due to increasing the dose of radiation received. This study evaluated the neutron flux generated by the 15 MV linac using foil activation technique. The 45 foils inserted in a solid phantom irradiated by the linac to determine the neutron flux on the function of depth. This value will be used to estimate the additional dose to the patient while undergoing treatment using the linac operating above 10 MV. By using a gamma spectrometer analysis of the activated indium foil, flux values increase by adding depth of up to 7 cm below the surface with a value of $2,6 \times 10^6 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ and it would be decrease by increasing depth. This pattern occurs because the neutron thermalization process. By using the method of thermal neutron dose conversion factor, additional dose for maximum neutron flux that received by patients was 0.86 mSv/min. This dose contribution is relatively small, it is only 0.1 % of the therapeutic dose.

KEYWORDS: Thermal neutron flux, LINAC, indium, phantom, activation foil.

PENDAHULUAN

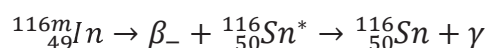
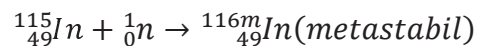
Tantangan utama dalam radioterapi adalah bagaimana menyampaikan dosis tinggi pada jaringan target (kanker) tanpa berefek negatif pada organ sehat. Upaya ini mulai diwujudkan dengan menggunakan pesawat *linac* yang mampu menghasilkan berkas pensil energi tinggi sehingga lebih baik dibandingkan pesawat cobalt-60 dalam meminimalkan kerusakan jaringan sehat [1]. Akan tetapi fakta menarik muncul ketika *linac* dioperasikan lebih dari 10 MV akan menghasilkan reaksi foto neutron. Reaksi foto neutron muncul ketika energi sinar-X tinggi berinteraksi dengan material komponen *linac* seperti pada bagian kolimator, target, filter dan komponen lainnya [1-7]. Produk reaksi foto neutron ini menghasilkan emisi neutron sebagai iradiasi sekunder [1-3, 8, 9], sehingga dapat menaikkan resiko kanker sekunder pada pasien akibat bertambahnya dosis radiasi yang diterima. Perhatian mengenai kontribusi neutron ini masih minim [10]. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fluks neutron pada fungsi kedalaman dari fantom padat, sehingga upaya ini bisa diarahkan pada estimasi perilaku neutron dalam organ tubuh pasien. Distribusi neutron termal yang tepat dalam fantom air tidak hanya dapat memberikan informasi primer untuk verifikasi dosis dari sudut pandang seorang fisikawan medis tetapi juga memberikan pemahaman tentang distribusi neutron dalam tubuh dari sudut pandang ahli radiologi [11].

Studi ini bertujuan untuk menentukan distribusi fluks neutron termal dalam fantom padat berdasarkan Metode Aktivasi Neutron (TAN). Metode TAN atau biasa dikenal dengan metode aktivasi merupakan metode pengukuran fluks neutron dengan cara meletakkan materi tertentu di dalam medan neutron, sehingga akan terjadi reaksi antara inti atom materi dengan neutron. Teknik aktivasi menggunakan foil menjadi salah satu pilihan yang sering digunakan untuk menentukan fluks neutron termal (ϕ_{th}) dalam satu decade ini [2, 9, 12-15]. Neutron termal dapat diidentifikasi menggunakan foil pilihan yang tepat meliputi emas (^{197}Au), indium (^{115}In), fosfor (^{31}P) dan disporium (^{164}Dy) [16, 17]. Studi mengenai distribusi neutron dalam fantom ini berdasarkan analisa 45 foil indium terinduksi neutron termal yang didistribusikan di ruangan *linac*.

METODE PERCOBAAN

Teknik Aktivasi foil.

Pengukuran fluks neutron dengan metode aktivasi foil dilakukan dengan cara meletakkan materi tertentu di dalam medan neutron, sehingga akan terjadi reaksi antara inti atom dengan neutron. Dari reaksi tersebut akan menyebabkan inti dalam keadaan tereksitasi yang bersifat radioaktif dan memancarkan partikel α , β dan γ secara serentak [18]. Untuk pengukuran neutron termal, indium merupakan bahan yang cocok dikarenakan memiliki *cross section* yang tinggi untuk pengukuran neutron termal (162 barn) dan waktu paruhnya yang cocok yaitu 54,1 menit [2, 3, 19]. Indium digunakan untuk mengukur distribusi neutron termal dalam fantom padat berdasarkan radioaktivitas yang terinduksi pada indium, mekanisme reaksi ^{115}In sebagai aktivasi neutron termal ditunjukkan pada reaksi berikut.



Adanya pelepasan partikel gamma dapat dimanfaatkan untuk menentukan nilai aktivitas indium menggunakan spektrometer gamma. Spektrometer yang digunakan pada penelitian ini adalah spektrometer gamma dengan detektor *High Purity Germanium* (HPGe) tipe GEM60 buatan ORTEC. Nilai aktivitas indium dengan kemurnian 99,993% ditentukan dengan memanfaatkan nilai efisiensi ϵ dari kalibrasi sumber standar filter 47 mm dengan persamaan (1),

$$A = \frac{cps}{\varepsilon \cdot y(E)} \quad (1)$$

Dengan diketahuinya nilai aktivitas indium (A) maka menurut Liu (2011) fluks neutron (ϕ_{th}) termal dapat ditentukan menggunakan persamaan (2):

$$\phi_{th} = \frac{A}{\sigma_{In} \times N_A \times \frac{m \times a}{M} \times \frac{(1 - e^{-\lambda t_i}) \times e^{-\lambda t_d} \times (1 - e^{-\lambda t_c})}{\lambda}} \quad (2)$$

yang mana cps adalah laju cacah per detik yang didapat dari output dari spektrometer gamma setelah dikurangi cacah latar, $y(E)$ adalah kelimpahan unsur indium pada energi yang dipilih, ϕ_{th} adalah fluks neutron termal ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$); σ_{In} tampang lintang reaksi aktivasi dari indium (162 barn); N_A adalah bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ per gram atom); m adalah massa foil indium (gram); a adalah *isotopic abundance* dari ^{115}In (95,7%); M adalah berat atom indium (114,82); λ adalah konstanta peluruhan rata indium $^{116\text{m}}\text{In}$ ($2,135 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$); t_i adalah waktu lamanya iradiasi (waktu operasi *linac*) dan t_c adalah lama *counting* alat dan t_d adalah durasi waktu antara iradiasi dan pengukuran [3, 9]. *Linac* akan dioperasikan dengan energi 15 MV, luas lapangan $20 \times 20 \text{ cm}^2$ selama 1 menit dan lama *counting* adalah 5 menit [9].



Gambar 1. Foil Indium diameter 1,4 cm dengan ketebalan 0.5 mm yang disisipkan pada fantom PMM dengan jarak antar foil 6 cm.

Faktor Absorpsi Diri Foil Indium.

Dalam penentuan fluks neutron termal menggunakan foil indium yang cukup tebal, maka perlu adanya faktor koreksi absorpsi diri, hal ini dikarenakan indium memiliki daya serap yang kuat terhadap neutron termal. Martinho[20] telah merumuskan faktor absorpsi diri dari foil indium (G_{th}),

$$G_{th} = \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^p} \quad (3)$$

yang mana z_0 dan p adalah konstanta berturut-turut 0,682 dan 0,990 (untuk bentuk foil). Sedangkan z adalah fungsi dimensi yang dinyatakan sebagai berikut

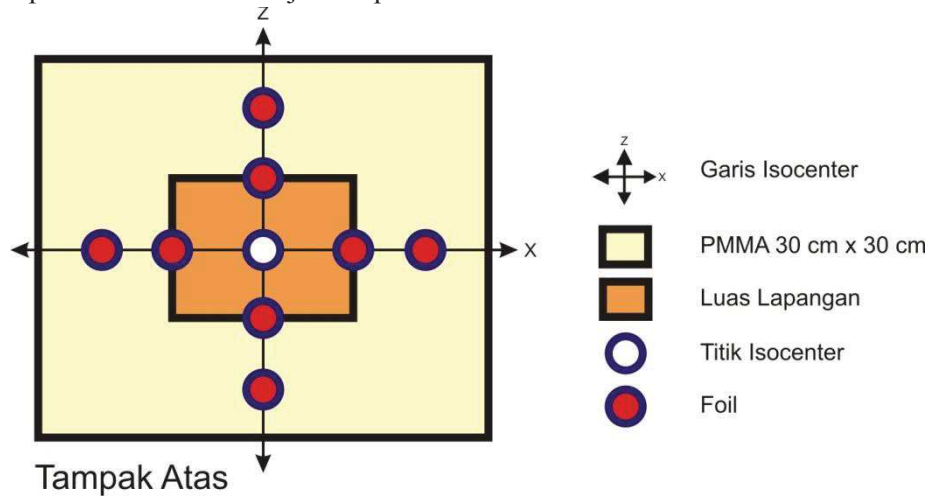
$$z = t \sum \left(\frac{\sum a}{\sum t} \right)^k \quad (4)$$

dengan k adalah konstanta bernilai 0.8, sedangkan t , $\sum a$, $\sum t$ berturut-turut ketebalan foil (dalam cm), absorpsi dan total tampang lintang rata-rata makroskopis spektrum neutron pada suhu kamar. Foil yang digunakan pada penelitian ini berdiameter 1,4 cm dengan ketebalan 0,5 mm (Gambar 1), sehingga

untuk faktor G_{th} didapatkan 0,73. Hasil dari perhitungan fluks neutron ini nantinya akan dikalikan dengan faktor $\frac{1}{G_{th}}$ yaitu sebesar 1,38.

Pengukuran Distribusi Fluks Neutron Termal Dalam Fantom Padat.

Pengukuran distribusi fluks neutron termal pada ruangan *linac* dilakukan dengan menempatkan foil pada konfigurasi seperti pada Gambar 2. Sebanyak 45 foil indium disisipkan dalam fantom dengan jarak antar foil sebesar 6 cm. Titik tengah dari fantom (0,0,0) diposisikan tepat di titik isocenter. Desain untuk penempatan foil indium ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah penempatan foil indium dalam fantom PMMA ukuran 30×30 cm².

Pengambilan data dilakukan dengan mengoperasikan *linac* 15 MV dengan dosis 400 MU, *Source Surface Distance* (SSD) 100 cm, luas lapangan 20×20 cm² selama 1 menit serta posisi gantri mengarah kebawah seperti tampak pada Gambar 3. Fantom padat yang digunakan terbuat dari bahan *polymethyl-methacrylate* (PMMA) berukuran 30×30×30 cm³. Untuk mengetahui aktivitas masing-masing indium, foil indium langsung dicacah menggunakan spektrometer gamma selama 5 menit per foil indium.

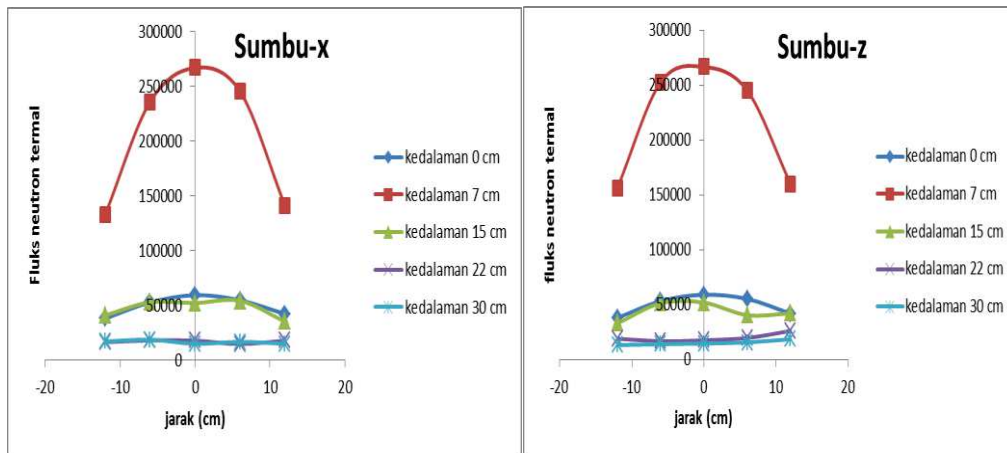


Gambar 3. Seting penyinaran fantom padat yang berisi foil indium pada titik isocenter dengan SSD 100 cm dan posisi gantri ke bawah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

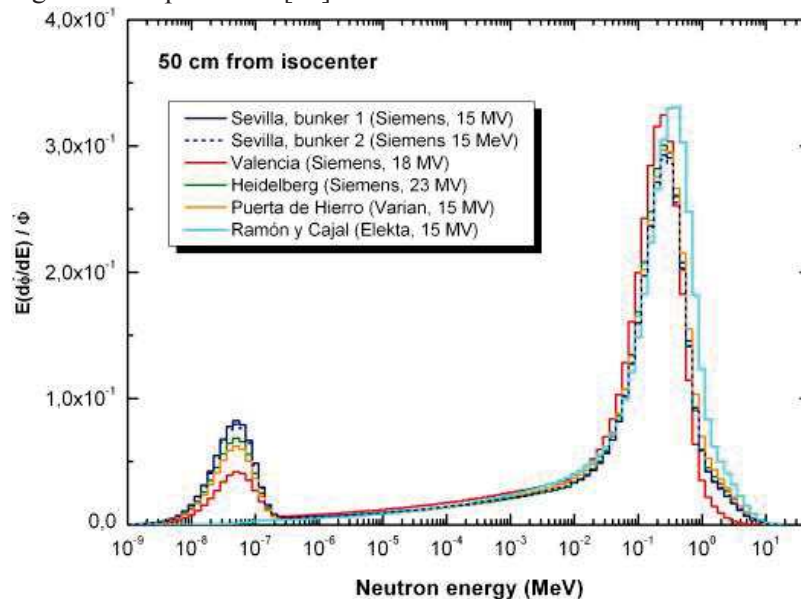
Distribusi Neutron Termal Dalam Fantom Padat.

Hasil pengukuran neutron pada fantom ditujukan untuk mengetahui bagaimana gambaran distribusi neutron termal dalam suatu kedalaman dari medium. Hasil dari pengukuran pada fantom ini dapat dijadikan referensi dosis yang mengenai tubuh. Distribusi fluks neutron termal berkisar $1,3 \times 10^5 - 2,6 \times 10^6 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ dalam fantom padat sebagai fungsi jarak ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Distribusi neutron dalam fantom padat (a) sumbu-x (b) sumbu-z.

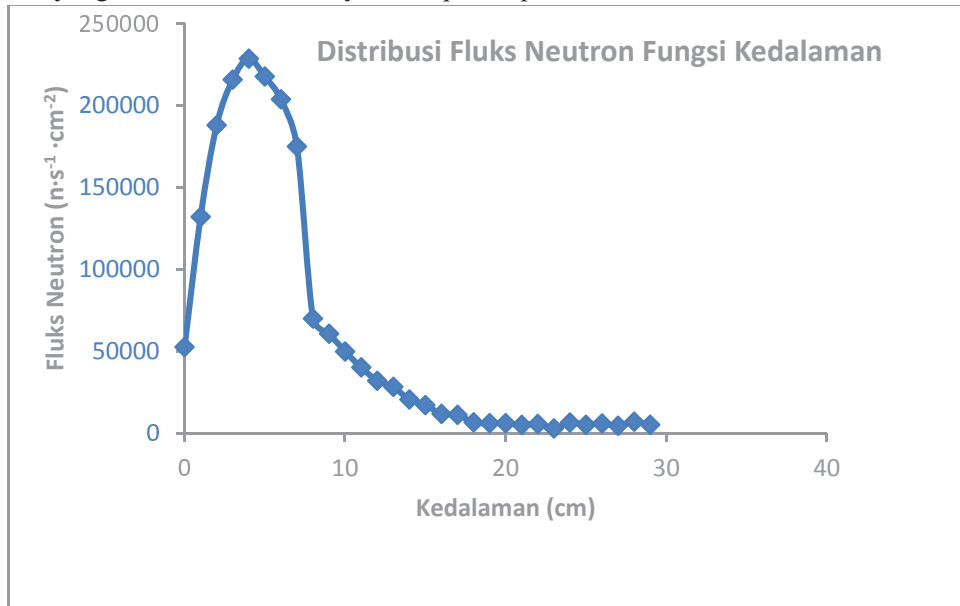
Nampak pada Gambar 4 bahwa fluks neutron tertinggi berada pada layer kedua, kemudian menurun seiring fungsi kedalaman. Nilai tertinggi pada *layer* kedua (kedalaman 7 cm) diduga karena adanya kontribusi neutron epitermal yang telah mengalami termalisasi dalam medium fantom, sementara neutron termal dalam hal ini masih belum habis sepenuhnya. Terkait dengan termalisasi dari neutron, Domingo (2010) menentukan spektrum neutron untuk beberapa tipe *linac* yang diberikan pada Gambar 5. Spektrum berwarna jingga pada Gambar 4 menunjukkan spektrum dari neutron pada operasi *linac* energi 15 MV tipe Varian [21].



Gambar 5. Spektrum neutron beberapa tipe *linac*[21].

Gambar 4 menunjukkan bahwa keberadaan neutron epitermal (0,5-10 keV) relatif besar sehingga jika neutron ini mengalami termalisasi, maka akan memberikan kontribusi tambahan neutron termal yang

ditangkap oleh foil indium. Penelitian dari Vierebl (2010) memberikan hasil bahwa neutron epitermal pada kedalaman 5 cm sudah mengalami termalisasi sebesar 90% [22]. Adapun untuk mengestimasi kontribusi dari neutron termal yang masih tersisa setelah melalui medium fantom, maka dapat merujuk dari penelitian dari Abuhoza (2001) bahwa pada kedalaman 7 cm, neutron termal tersisa 75% [23]. Itulah sebabnya pada hasil penelitian ini didapatkan bahwa nilai fluks neutron tertinggi bukan berada pada titik isosenter, tetapi pada kedalaman tertentu. Artinya, kontribusi dosis neutron terbesar bukan pada daerah permukaan (kulit) melainkan akan optimum pada kedalaman tertentu. Untuk mengetahui dimana fluks neutron termal pada keadaan optimum, sebanyak 30 foil indium ditempatkan per 1 cm pada fantom yang diiradiasi dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Distribusi fluks neutron termal fungsi kedalaman.

Gambar 5 tersebut dapat diketahui bahwa fluks neutron termal mencapai maksimum di kedalaman 4 cm. Sebagai komparasi, Tabel 1 menunjukkan fluks neutron optimum pada kedalaman 2 - 10 cm. Adanya perbedaan fluks neutron yang optimum pada kedalaman tertentu karena adanya perbedaan medium fantom (air dan PMMA). Hal ini disebabkan dari komponen penyusun dari medium itu sendiri. Ruslan menyebutkan bahwa hidrogen merupakan moderator yang baik dalam termalisasi neutron [24]. Untuk medium air, rasio antara hydrogen dan unsure lainnya (hidrogen dan oksigen) adalah 2;1, sedangkan pada PMMA (C₅O₇H₈), rasio dari hydrogen dari unsur lainnya adalah (8:7). Semakin tinggi rasio hidrogen dalam suatu material, maka semakin efektif material tersebut sebagai medium termalisasi (moderator) neutron.

Tabel 1. Komparasi penelitian mengenai fluks neutron termal optimum pada kedalaman tertentu.

Peneliti	medium	kedalaman	Sumber neutron
Studi ini	PMMA	4 cm	Varian Clinic iX 15 MV
Najem [25]	air	2,8 cm	Varian <i>Clinac</i> 2100C 15 MV
Abuhoza	air	4 cm	Sumber Am-Be
Komura, dkk [26]	air	10 cm	Kosmis

Dosis neutron termal padapasien.

Dengan adanya neutron sebagai produk tambahan pada penggunaan *linac* untuk terap kanker, maka sebaiknya pasien mendapatkan tindakan keselamatan tambahan. Mengingat, selama ini pertimbangan adanya neutron ini tidak dimasukkan dalam *Treatment Planning System*. Untuk memperkirakan dosis tambahan akibat adanya neutron termal, Kry (2004) menentukan faktor konversi

dosis untuk neutron termal adalah $3.74 \cdot 10^7 \text{ n/cm}^2 \text{ s/mSv}$ [27]. Sehingga dosis neutron termal tambahan yang diterima pasien untuk fluks neutron termal $2,6 \times 10^6 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ adalah sebesar 0,86 mSv/menit. Jika pasien diterapi selama 2,5 menit dengan dosis sebesar 4 Gy untuk sinar-X, maka akan dihasilkan dosis tambahan dari radiasi neutron termal sebesar 2,1 mSv. Kontribusi dosis ini relatif kecil yaitu sebesar 0,1% dari dosis terapi.

KESIMPULAN

Studi evaluasi distribusi fluks neutron pada fantom telah dilakukan dengan metode aktivasi foil. Foil Indium diaktivasi oleh *linac* Varian IX yang beroperasi pada energi 15 MV, dan dianalisis menggunakan spektrometer gamma dengan detektor HPGe. Hasil analitik spektrum mengindikasikan bahwa metode aktivasi foil efektif dalam menentukan distribusi spasial neutron termal dalam fantom. Fluks neutron termal pada titik isosenter (0,0,0) sebesar $6,0 \times 10^4 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dan mencapai maksimum pada kedalaman 7 cm dari permukaan yaitu sebesar $2,6 \times 10^5 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. Dengan nilai tersebut, maka dosis neutron termal ini memberikan kontribusi tambahan pada pasien sebesar 0,86 mSv/menit.

DAFTAR PUSTAKA

1. Facure A, Falcao RC, Silva AX, Crispim VR, Vitorelli JC. A study of neutron spectra from medical linear accelerators. *Applied Radiation and Isotopes*. 2004;62:69-72.
2. Konefal A, Orlef A, Dybek M, Maniakowski Z, Polaczek-Grelik K, Zipper W. Correlation between radioactivity induced inside the treatment room and the undesirable thermal/resonance neutron radiation produced by linac. *Physica Medica*. 2008;24:212-8.
3. Chao JH, Liu WS, Chen CY. Estimation of Argon-41 concentrations in the vicinity of a high-energy medical accelerator. *Radiation Measurement*. 2007;42:1538-44.
4. Donadille L, Trompier F, Robbes I, Derreumaux S, J.Mantione, Asselineau B, et al. Radiation protection of workers associated with secondary neutrons produced by medical linear accelerators. *Radiation Measurements*. 2008;43:939-43.
5. Fujibuchi T, Obara S, Sato H, Nakajima M, Kitamura N, Sato T, et al. Estimate of photonuclear reaction in a medical linear accelerator using a water-equivalent phantom. *Progress in Nuclear Science and Technology*. 2011;2:803-7.
6. Al-Ghamdi H, Fazal-ur-Rehman, Al-jarallah MI, Maalej N. Photoneutron intensity variation with field size around radiotherapy linear accelerator 18-MeV X-ray beam. *Radiation Measurement*. 2008;43:495-9.
7. Patil BJ, Chavan ST, Pethe SN, Krishnan R, Bhoraskar VN, Dhole SD. Estimation of neutron production from accelerator head assembly of 15 MV medical LINAC using FLUKA simulations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2011;269:3261-5.
8. Polaczek-Grelik K, Karaczyn B, Konefal A. Nuclear relations in linear medical accelerators and their exposure consequences. *Applied Radiation and Isotopes*. 2012;70:2332-9.
9. Liu W-S, Changlai S-P, Pan L-K, Tseng H-C, Chen C-Y. Thermal neutron fluence in a treatment room with a varian linear accelerator at a medical university hospital. *Radiation Physics and Chemistry*. 2011;80:917-22.
10. Chen CC, Sheu RJ, Yeh CY, Lin UT, Jiang SH. A detailed study on the neutron contamination for a 10 MeV medical electron accelerator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2006;562:1033-7.

11. Liu M-T, Huang S-S, Liu W-S, Yea D-M. Distribution os spatial photoneutrons inside a 70 kg water phantom via neutron activation analysis. *Applied Radiation and Isotope*. 2010;68:1816-21.
12. Chao JH, Chiang AC. Activation detection using indium foils for simultaneous monitoring neutron and photon intensities in a reactor core. *Radiation Measurement*. 2010;45:1024-33.
13. Chao J-H, Hsu P-C, Liu H-M. Measurement of high dose rates by photon activation of indium foils. *Applied Radiation and Isotopes*. 2001;55:549-56.
14. Tuo F, Zhou F, Yi Y, Cao X, Kong X. Cross-section measurements for the reactions of 14 MeV neutrons on indium isotopes. *Applied Radiation and Isotopes*. 2006;64:910-4.
15. Konefal A, Orlef A, Laciak M, Ciba A, Szewczuk M. Thermal and resonance neutrons generated by various electron and X-ray therapeutic beams from medical linacs installed in polish oncological centers. *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*. 2012;17:339-46.
16. IAEA. Handbook Nuclear Activation Cross Section. Vienna: IAEA; 1974.
17. NCRP. Neutron Contamination from medical electron accelerator. USA: NCRP; 1984.
18. Suparman LY, WIdarto, Wiyatmo Y. Penentuan karakteristik distribusi fluks neutron termal di fasilitasrriadiasi Lazy Suzan (LS) arah horizontal reaktor Kartini. *Prosiding Seminar Nasional ke-17 dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir [Internet]*. 2011.
19. Reus V, Westmeierr W. Catalog of gamma ray from radioactive decay. *At Data Nucl*1983.
20. Martinho E, Salgado J, Goncalves IF. Universal curve of the thermal neutron self-shielding factor in foil, wires, spheres and cylinders. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2004;261:637-43.
21. Domingo C, Garcia-Fuste MJ, Moralez E, K.Amgarou, Terron JA, Rosello J, et al. Neutron spectrometry and determination of neutron ambient dose equivalents in different LINAC radiotherapy rooms. *Radiation Measurements*. 2010;45:1391-7.
22. Viererbl L, Klupak V, Lahodova Z, Marek M, Burian J. Neutron fluence depth profiles in water phantom on epithermal beam of LVR-15 research reactor. *Applied Radiation and Isotopes*. 2010;68:617-9.
23. Abuhoza AAA. Comparison study of reflected and transmitted thermal neutron flux in water and other moderators. Riyadh: King Saud University; 2007.
24. Ruslan, Wahyudi BI, Hidayat EP, Rial A, Shiddiq M. *Info Nuklir*. Jakarta: Pusat Diseminasi Iptek Nuklir Badan Tenaga Nuklir NAsional.
25. Najem MA, Spyrou NM, Podolyak Z, Abolaban FA. The physical characteristics of the 15 MV Varian Clinac 2100C. *Radiation Physics and Chemistry*. 2013.
26. Komura K, Ahmed NK, El-Kamel AH, Ypusef MM. Variation of enviromental neutron flux with the depth of water and soil. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*. 2008;9:45-7.
27. Kry S, Salehpour M, Followil DS, Stoval M, Kuban DA, White RA, et al. Out-of-field photon and neutron dose equivalents from step-and-shoot intensity-modulated radiation therapy. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*. 2004;62:1204-16.