

Pengukuran Fluks Neutron Termal pada Ruangan *Treatment* LINAC iX 15 MV

Risalatul Latifah^{1)*}, Johan AE Noor¹⁾, Bunawas²⁾

¹⁾ Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

²⁾ Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR-BATAN), Jakarta Selatan

Diterima 02 Agustus 2013, direvisi 17 Oktober 2013

ABSTRAK

Linac yang dioperasikan di atas 10 MV akan menghasilkan radiasi sekunder berupa emisi neutron yang berasal dari reaksi energi foton tinggi menumbuk material penyusun *linac* seperti target, kolimator dan filter. Radiasi sekunder ini akan menaikkan resiko kanker sekunder pada pasien akibat bertambahnya dosis radiasi yang diterima. Studi ini mengevaluasi fluks neutron termal spasial pada ruangan *Linac* yang dioperasikan 15 MV menggunakan metode aktivasi foil. Sebanyak 14 foil ¹¹⁵In ditempatkan tersebar di dalam ruangan *treatment* yang terpapar pesawat *linac* 15 MV selama 1 menit. Hasil menunjukkan fluks tertinggi terdapat di sekitar *isocenter* sebesar $2,2 \times 10^6 n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$. Dengan nilai fluks tersebut dosis tambahan akibat neutron sebesar 0,04 n Sv/menit. Nilai fluks menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber berkas. Terkait dengan upaya proteksi radiasi untuk pekerja radiasi, adanya kontribusi dosis yang berasal dari neutron perlu ditindak lanjuti dengan menambah *shielding* pada pintu.

Kata kunci: Fluks neutron *thermal*, LINAC, indium, aktivasi foil.

ABSTRACT

Linac is operated at above 10 MV will generate secondary radiation in the form of neutron emission from the reaction of the high photon energy *linac* striking the material components of *linac* such as targets, collimators and filters. Secondary radiation will increase the probability of the secondary cancer risk in patients due to increasing the dose of radiation received. This study evaluated the thermal neutron flux at the indoor spatial operated 15 MV *linac* using foil activation method. A total of 14 Indium-115 foil placed in the *treatment* room were exposed to 15 MV *linac* plane for 1 minute. Results showed the highest flux are around *isocenter* ($2,2 \times 10^6 n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$). With the flux value of additional dose due to the neutron flux at 0,04 n Sv/menit. FLux decreases as distance function. Related to radiation protection efforts for radiation workers, the contribution coming from the neutron dose necessary acted upon by adding *shielding* on the door.

Keywords: thermal neutron flux, LINAC, foil activation.

PENDAHULUAN

Dewasa ini, penyembuhan penyakit kanker mulai dialihkan dari pesawat teleterapi cobalt dan cesium pada pesawat akselerator linear (*linac*). Keuntungan utama *linac* dibandingkan

pesawat teleterapi adalah tidak lagi menggunakan sumber radioaktif serta memiliki variasi energi sehingga bisa disesuaikan dengan kebutuhan, dan hal ini dianggap jauh lebih aman jika ditinjau dari segi radiologi [1]. Sebuah pesawat *linac* memiliki energi maksimum foton dari rentang 4 MV hingga 25 MV. Ketika pesawat *linac* dioperasikan pada energi di atas 10 MV, maka akan terjadi reaksi fotoneutron (γ, n) hasil dari interaksi sinar-X energi tinggi dengan material

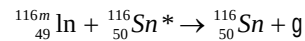
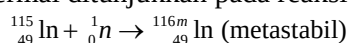
*Corresponding author :
E-mail: risa_latifah@yahoo.com

komponen *linac* seperti pada bagian kolimator, target, filter dan komponen lainnya [1-7]. Reaksi fotoneutron ini akan menghasilkan emisi neutron [1-3, 8-10]. Chao [3] melaporkan bahwa walaupun dengan dosis yang rendah yaitu sekitar 1% di ruangan *treatment*, namun hasil reaksi fotoneutron ini akan berpotensi besar bereaksi dengan materi yang ada di sekitar (ruangan) dan mengaktifkan materi itu menjadi radioaktif. Perhatian mengenai kontribusi neutron ini masih minim [11]. Oleh karena itu, diperlukan perhatian khusus mengenai evaluasi dari dosis tambahan dari neutron yang diproduksi dalam ruangan terapi, tidak hanya untuk pasien, namun juga untuk area sekitarnya [12].

Metode aktivasi foil menjadi salah satu pilihan yang sering digunakan untuk menentukan fluks neutron termal (ϕ_{th}) dalam dekade ini [2, 9, 13-16]. Neutron termal dapat diidentifikasi menggunakan foil pilihan yang tepat meliputi emas (^{197}Au), indium (^{115}In), fosfor (^{31}P) dan disporium (^{164}Dy) [17, 18]. Studi mengenai distribusi neutron dalam ruangan *treatment* ini berdasarkan analisa 14 foil indium terinduksi neutron termal yang didistribusikan di ruangan *linac*.

METODE PENELITIAN

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 [19]. 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, 20]. Inilah alasan penggunaan indium pada penelitian ini. Indium digunakan untuk mengukur distribusi neutron termal di sekitar ruangan *linac* 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 ditentukan dengan memanfaatkan nilai efisiensi ϵ dari kalibrasi sumber standar filter 47 mm dengan persamaan (1) berikut :

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

Dengan diketahuinya nilai A , maka menurut Liu (2011) fluks neutron dapat dicari menggunakan persamaan (2):

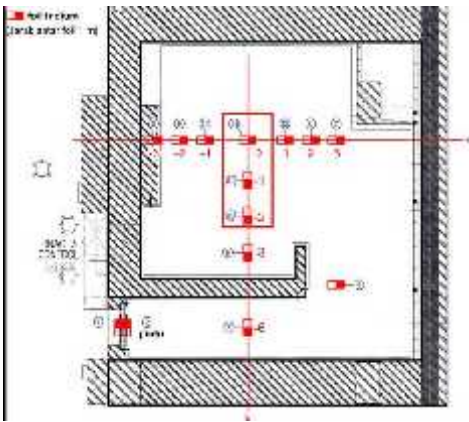
$$f_{th} = \frac{A}{S_{in} N_A \frac{ma}{M} \frac{(1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})}{\lambda}} \quad (2)$$

yang mana *cps* adalah laju cacah per detik yang di dapat 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} reaksi aktivasi *cross section* 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 ^{116m}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 20×20 selama 1 menit dan lama *counting* adalah 5 menit [9].



Gambar 1. Foil Indium diameter 2,3 cm.

Tabel 1. Hasil Pengukuran fluks neutron di titik pengambilan data.

Denah Penempatan Foil	No Foil	Koordinat Foil	Nilai Fluks Neutron (n cm ⁻² s ⁻¹)
	1	(-3,-6,2)	0
	2	(-3,-6)	142
	3	(0,-6)	304
	4	(3,-4)	3429
	5	(0,-3)	6802
	6	(-3,0)	8234
	7	(3,0)	5804
	8	(2,0)	6753
	9	(-2,0)	9280
	10	(0,-2)	7974
	11	(-1,0)	9619
	12	(1,0)	8507
	13	(0,-1)	9619
	14	(0,0)	9660

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 [21] telah merumuskan faktor absorpsi diri dari foil indium (G_{th}) sebagai berikut:

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

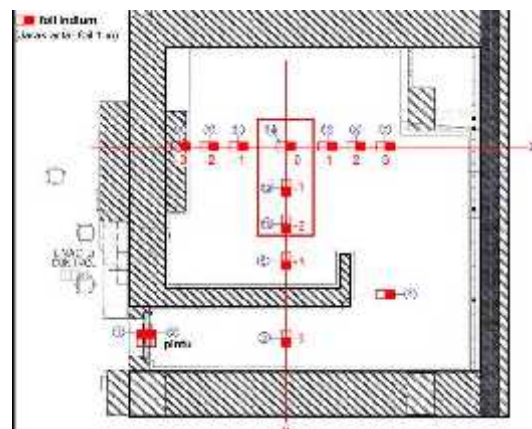
yang mana z_0 dan p adalah konstanta berturut-turut 0,682 dan 0,990 (untuk bentuk foil). Sedangkan z adalah fungsi dimensi yang dinyatakan sebagai berikut,

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

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 2,3 cm dengan ketebalan 0,5 mm (Gambar 2), 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.

Penempatan foil dalam ruangan *treatment linac*. Pengukuran fluks neutron termal pada ruangan *treatment linac* dilakukan dengan menempatkan 14 foil dengan konfigurasi seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Pengambilan data dilakukan dengan

mengoperasikan *linac* pada energi 15 MV dengan dosis 400 MU selama 1 menit. Untuk mengetahui aktivitas masing-masing indium, foil indium langsung dicacah menggunakan spektrometer selama 5 menit per indium. Penempatan foil seperti tampak pada Gambar 2.

**Gambar 2.** Denah penempatan foil indium di ruangan *treatment linac*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

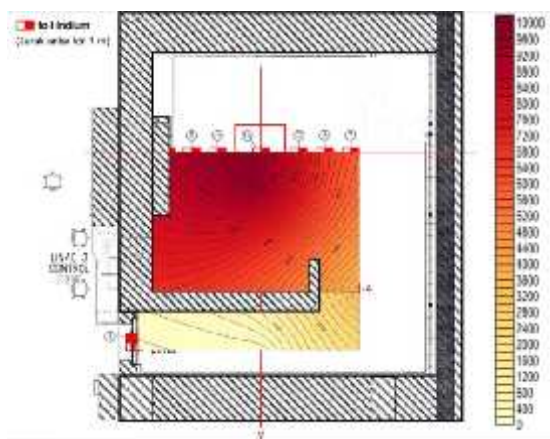
Distribusi spasial neutron di ruangan *linac*. Tabel 1 menunjukkan nilai fluks neutron yang terdapat pada titik pengambilan data (foil indium). Berdasarkan pengukuran 14 foil indium, diperoleh informasi bahwa distribusi neutron termal rata-rata di ruangan *treatment linac* berkisar antara $1,4 \times 10^2 - 0,9 \times 10^2$ n cm⁻² s⁻¹. Fluks tertinggi terdapat di daerah

Tabel 2. Komparasi nilai fluks neutron.

Referensi	Berkas	Jenis <i>linac</i>	Luas Lapangan (cm)	$(n \cdot cm^{-2})$
Studi ini	15 MV	Varian <i>Clinac</i> iX	20 × 20	$0,9 \cdot 10^{11}$
Liu, 2011 [9]	15 MV	Varian <i>Clinac</i> 21EX	20 × 20	$2,0 \cdot 10^{11}$
Konefal, 2005 [26]	15 MV	Primus Siemens	20 × 20	$2,9 \cdot 10^{11}$
Gur, 1978 [27]	18 MV	Philips SL/75-20	10 × 10	$1,4 \cdot 10^{11}$
Palta, 1984 [28]	18 MV	Mevatron 77	15 × 15	$2,3 \cdot 10^{11}$
Lin, 2001 [29]	20 MV	Varian <i>Clinac</i> 2300	10 × 10	$1,5 \cdot 10^{11}$
Uwamino, 1985 [30]	21 MV	Microtron, MM22	10 × 10	$3,2 \cdot 10^{11}$

isocenter, dan terendah di daerah labirin (*maze*).

Nilai-nilai fluks ini dapat ditampilkan dengan *software suffer* dalam bentuk grafik dua dimensi untuk mengetahui distribusi neutron di ruangan *linac* seperti tersaji pada Gambar 3.

**Gambar 3.** Distribusi spasial neutron di ruangan *linac*.

Nampak dari Gambar 2 di atas, nilai fluks neutron menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber berkas (*head*). Jika dilihat lebih seksama, nilai fluks daerah sumbu-x negatif memiliki nilai lebih besar dibandingkan area sumbu-x positif, ini diduga karena pada daerah sumbu-x negatif menerima neutron hamburan yang berasal dari bagian *concrete* dan atap. Mengingat daerah sumbu-x negatif ini lebih dekat dengan beberapa *concrete* jika dibandingkan dengan sumbu-x positif, sehingga peluang adanya hamburan di daerah sumbu-x negatif lebih besar [22-24].

Pengukuran fluks neutron termal pada ruangan *treatment linac* juga telah dilakukan beberapa peneliti sebelumnya dengan berbagai jenis tipe *linac* dan energi operasinya. Sebagai

komparasi, Tabel 1 menyajikan nilai fluks neutron yang berada di titik yang sama, yaitu *isocenter*. Adanya perbedaan dari nilai fluks neutron yang dihasilkan walaupun dengan nilai voltase dan luas lapangan yang berbeda disebabkan karena jenis dari *linac* ini berbeda. Setiap jenis *linac* memiliki bahan penyusun yang berbeda untuk komponennya, sedangkan salah satu yang mempengaruhi reaksi foroneutron dalam *linac* adalah material komponen *linac* itu sendiri [25].

Fluks neutron di daerah labirin (*maze*).

Distribusi fluks neutron termal di daerah *maze* terlihat pada area warna biru tua Gambar 2, nilai fluks neutron di bawah $0,3 \cdot 10^3 n \cdot cm^{-2}$, hampir 32 kali lebih rendah dibandingkan dengan nilai fluks neutron termal di daerah *isocenter*. Nilai fluks neutron termal bertambah kecil di daerah pintu sisi dalam (berkisar $0,9 \cdot 10^2 n \cdot cm^{-2}$). Nilai fluks neutron yang rendah ini disebabkan neutron termal telah habis terserap oleh *concrete* sisi dalam. Nilai fluks neutron di daerah *maze* ini diestimasi berkontribusi oleh neutron hamburan dari *concrete* serta berasal dari neutron cepat yang mengalami termalisasi ketika menembus dinding [22-24]. Fluks neutron yang berasal dari termalisasi dari neutron yang memiliki energi lebih dari neutron termal (lebih dari 0,025 keV) juga dapat dilihat dari nilai fluks neutron termal yang ditangkap oleh foil indium yang ditempatkan pada pintu sisi luar dengan fluks neutron termalnya bernilai 0. Nilai ini tidak sepenuhnya benar, karena dimungkinkan nilai fluks neutron termal pada titik ini di bawah limit deteksi, sehingga spektrometer gamma tidak mampu mencacah indium yang telah teraktivasi. Di lain itu, data antara fluks

neutron termal yang berada pada sisi pintu bagian dalam dan luar memberi informasi bahwa faktor *shielding* dari pintu telah mampu menahan hampir 100% fluks neutron yang berasal dari dalam ruangan *linac*. Karena dimungkinkan masih adanya kontribusi neutron yang masih ada pada daerah *console*, maka untuk kaitan proteksi, pekerja radiasi ataupun pihak yang berkaitan dalam *treatmentlinac* dianjurkan untuk tidak berdiri tepat di depan pintu. Untuk tindakan proteksi radiasi yang lebih, maka diperlukan tambahan *shielding* pada pintu [12] agar benar-benar tidak ada kebocoran neutron di luar ruangan *treatment*. Sebagai acuan, Liu [9] menyarankan sebuah ruangan *treatment* penambahan 10 cm *polyethylene* pada pintu yang menghasilkan fluks neutron dengan orde 10^3 di daerah *maze* nya.

Estimasi dosis kontribusi dari neutron.

Liu [9] menyatakan bahwa paparan dari neutron termal tidak dipertimbangkan dalam *treatment planing* pada pasien. Akan tetapi, jika dilihat dari faktor bobot radiasi dari neutron, maka radiasi ini tidak bisa diabaikan. Kry [31] memberikan faktor konversi dosis dari neutron termal yaitu $3,7 \times 10^7 \frac{n \cdot s}{cm^2 \cdot mSv}$. Dengan demikian dapat diperkirakan bahwa dosis ekuivalen pada daerah *isocenter* yaitu berkisar 0,04 mSv per *treatment*. Kontribusi dosis neutron ini memberikan dosis tambahan 0,01% dari dosis *treatment linac* (2000 mSv).

KESIMPULAN

Metode aktivasi foil merupakan metode yang efektif untuk menentukan fluks neutron termal yang dihasilkan oleh pesawat *linac* dengan energi operasi 15 MV. Nilai fluks neutron termal yang didapat menunjukkan nilai tertinggi berada di daerah *isocenter* $0,9 \times 10^4 n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ dan menurun seiring bertambahnya jarak. Nilai fluks tersebut setara dengan dosis ekuivalen 0,04 mSv per *treatment*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Facure A, Falcao RC, Silva AX, Crispim VR and Vitorelli JC (2004), A Study of Neutron Spectra from Medical Linear Accelerators, *Applied Radiation and Isotopes* **62**: 69-72.
- [2] Konefal A, Orlef A, Dybek M, Maniakowski Z, Polaczek-Greluk K, and Zipper W. (2008), Correlation between Radioactivity Induced Inside the Treatment Room and the Undesirable Thermal/Resonance neutron Radiation Produced by Linac, *Physica Medica*. **24**: 212-8.
- [3] Chao JH, Liu WS and Chen CY (2007). Estimation of Argon-41 Concentrations in the Vicinity of a High-Energy Medical Accelerator. *Radiation Measurement*. **42**: 1538-44.
- [4] Donadille L, Trompier F, Robbes I, Derreumaux S, J.Mantione, Asselineau B, et al. (2008) Radiation Protection of Workers Associated with Secondary Neutrons Produced by Medical Linear Accelerators. *Radiation Measurements*. **43**: 939-43.
- [5] Fujibuchi T, Obara S, Sato H, Nakajima M, Kitamura N, Sato T, et al (2011). Estimate of Photonuclear Reaction in a Medical Linear Accelerator Using a Water-Equivalent Phantom. *Progress in Nuclear Science and Technology*. **2**: 803-7.
- [6] Al-Ghamdi H, Fazal-ur-Rehman, Al-jarallah MI, and Maalej N. (2008), Photoneutron intensity variation with Field Size Around Radiotherapy Linear Accelerator 18-MeV X-Ray Beam, *Radiation Measurement*, **43**: 495-9.
- [7] Patil BJ, Chavan ST, Pethe SN, Krishnan R, Bhoraskar VN, and Dhole SD. (2011), Estimation of neutron production from accelerator head assembly of 15 MV medical LINAC using FLUKA simulations, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. **269**: 3261-5.

- [8] Polaczek-Grelík K, Karaczyn B and Konefal A. (2012), Nuclear Relations in linear Medical Accelerators and Their Exposure Consequences, *Applied Radiation and Isotopes*, **70**: 2332-9.
- [9] Liu W-S, Changlai S-P, Pan L-K, Tseng H-C and Chen C-Y. (2011), Thermal Neutron Fluence in a Treatment Room with a Varian Linear Accelerator at a Medical University Hospital, *Radiation Physics and Chemistry*, **80**: 917-22.
- [10] Liu M-T, Huang S-S, Liu W-S, and Yea D-M. (2010), Distribution of spatial photoneutrons inside a 70 kg water phantom via neutron activation analysis, *Applied Radiation and Isotopes*, **68**: 1816-21.
- [11] Chen CC, Sheu RJ, Yeh CY, Lin UT, and Jiang SH. (2006), A detailed study on the neutron contamination for a 10 MeV medical electron accelerator, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **562**:1033-7.
- [12] Ghassoun J and Senhou N. (2012), The evaluation of neutron and gamma ray dose equivalent distributions in patients and the effectiveness of shield materials for high energy photons radiotherapy facilities, *Applied Radiation and Isotopes*, **70**: 620-4.
- [13] Chao JH and Chiang AC. (2010), Activation detection using indium foils for simultaneous monitoring neutron and photon intensities in a reactor core, *Radiation Measurement*, **45**:1024-33.
- [14] Chao J-H, Hsu P-C, and Liu H-M. (2001), Measurement of high dose rates by photon activation of indium foils, *Applied Radiation and Isotopes*, **55**:549-56.
- [15] Tuo F, Zhou F, Yi Y, Cao X, and Kong X. (2006), Cross-section measurements for the reactions of 14 MeV neutrons on indium isotopes, *Applied Radiation and Isotopes* **64**: 910-4.
- [16] Konefal A, Orlef A, Laciak M, Ciba A and Szewczuk M. (2012), 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*. **17**: 339-46.
- [17] IAEA (1974), *Handbook Nuclear Activation Cross Section*, Vienna: IAEA.
- [18] NCRP (1984), *Neutron Contamination from medical electron accelerator*, USA: NCRP.
- [19] Suparman LY, Widarto, dan Wiyatmo Y (2011). Penentuan Karakteristik Distribusi Fluks Neutron Termal di Fasilitas Irradiasi Lazy Suzan (LS) Arah Horizontal Reaktor Kartini, *Prosiding Seminar Nasional ke-17 dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*.
- [20] Reus V and Westmeier W (1983), Catalog of gamma Ray from radioactive decay, *At Data Nucl*.
- [21] Martinho E, Salgado J, and Goncalves IF (2004), Universal curve of the thermal neutron self-shielding factor in foil, wires, spheres and cylinders, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. **261**: 637-43.
- [22] Vega-Carillo HR, Manzanares-Acuna E, Iniguez MP, Gallego E, and Lorente A (2007), Study room-return neutron. *Radiation Measurements*, **42**: 413-9.
- [23] McCall RC, McGinley PH, and Huffman KE. (1999), Room Scattered neutrons. *Medical Physics*. **26**:206-7.
- [24] Eisenhower CM, and Schwartz RB (1981), Measurement of neutrons reflected from the surface of a calibration room. *Health physics*. **42**: 489-95.
- [25] Wang YZ. (2004), *Photoneutron and Induced Activity from Medical Linear Accelerators*, Montreal-Canada: McGill University.
- [26] Konefal A, Dybek m, Zipper W, Lobodziec W, and Szczucka K. (2005), Thermal and epithermal neutrons in the vicinity of the Primus Siemens biomedical accelerator, *Nukleonika*, **50**: 73-81.
- [27] Gur D, Rosen JC, Bukovitz AG, and Gill AW. (1978), Fast and slow neutrons in an 18-MV photon beam from a Philips SL75-20 linear accelerator, *Medical Physics*, **5**:221-2.
- [28] Palta JR, Hogstrom KR, and Tannanonta C. (1984), Neutron leakage measurements from a medical accelerator. *Radiation Measurement*, **11**: 498-501.
- [29] Lin JP, Chua TC, Lin SY, and Liu MT. (2001) The Measurement of photoneutrons in the vicinity of a Siemens Primus Linear Accelerator,

- Applied Radiation and Isotope*, **55**: 397-402.
- [30] Uwamino Y, Nakamura T, Ohkubo T, and Hara A. (1986), Measurement and Calculation of neutron leakage from a medical electron accelerator. *Medical Physics*, **13**:374-84.
- [31] Kry S, Salehpour M, Followil DS, Stoval M, Kuban DA, White RA, et al. (2004) Out-of-field photon and neutron dose equivalents from step-and-shoot intensity-modulated radiation therapy. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, **62**:1204-16.