

# Penentuan Spektrum Neutron di LINAC Menggunakan *Passive Single Sphere Spectrometer*

Muhammad Helmi Hakim<sup>1)\*</sup>, Chomsin Sulistyia<sup>2)</sup>, Bunawas<sup>3)</sup>, Rasito<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Magister Ilmu Fisika, Jurusan Fisika, Universitas Brawijaya

<sup>2)</sup> Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya

<sup>3)</sup> Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, BATAN

<sup>4)</sup> Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan, BATAN

Diterima 04 Oktober 2016, Direvisi 28 Oktober 2016

## ABSTRAK

Spektrum neutron di *Linear Accelerator* (LINAC) diperlukan dalam kegiatan proteksi radiasi neutron. Tujuan penentuan spektrum neutron di LINAC menggunakan *Passive Single Sphere Spectrometer* adalah mendapatkan spektrum dan nilai fluks neutron yang dihasilkan dari LINAC dan mengetahui pengaruh tegangan masukan pada LINAC terhadap spektrum dan fluks neutron keluaran. Perangkat *Single Sphere Spectrometer* (SSS) dengan diameter 30 cm menggunakan detektor keping emas yang berjumlah tujuh keping diletakkan pada posisi dengan jari-jari (0, 3, 6, 9, 11, 12, 13 cm) dari pusat SSS. Pengukuran laju cacah dilakukan dengan menempatkan SSS tepat di bawah gantry LINAC dengan jarak SSD 100 cm. Selanjutnya, laju cacah digunakan sebagai data masukan program UMG 3.3 untuk mendapatkan spektrum. Dari hasil pengukuran, fluks neutron total pada LINAC 10 MV dan 15 MV sebesar  $5,78 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \pm 0,01 \times 10^4$  dan  $9,44 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \pm 0,22 \times 10^5$ , sehingga kenaikan tegangan masukan pada LINAC diikuti oleh kenaikan fluks neutron.

**Kata kunci:** spektrum neutron, LINAC, SSS, tegangan masukan

## ABSTRACT

Neutron spectra at Linear Acceleration (LINAC) facility was needed to protect neutron radiation. The purpose of determination of neutron spectra at LINAC using Passive Single Sphere Spectrometer is getting spectra and neutron fluence from LINAC and knowing the influence of input voltage at LINAC to its spectra and neutron fluence output. Single Sphere Spectrometer (SSS) with diameters 30 cm using seven gold foil detectors was set in position a half of diameter (0, 3, 6, 9, 11, 12, 13 cm) from center of the SSS. Measurement of neutron count rate was performed by placing SSS under gantry of LINAC with SSD 100 cm in distances. Next, neutron count rate was used as input data in UMG 3.3 program to get spectra. Based on measurement, total of neutron fluence at LINAC 10 MV and 15 MV is  $5,78 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \pm 0,01 \times 10^4$  and  $9,44 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \pm 0,22 \times 10^5$ , so increasing input voltage at LINAC was followed by increased neutron fluence.

**Keywords:** Faloak extract, Pb, tilapia egg, membrane potential

## PENDAHULUAN

Neutron merupakan partikel penyusun inti atom yang tidak mempunyai muatan listrik, karena tidak memiliki muatan listrik maka gerak neutron tidak dipengaruhi oleh medan

listrik disekitarnya, sehingga partikel neutron memiliki daya tembus yang tinggi [1]. Tampang lintang interkasi neutron peratom bergantung pada energi dan komposisi material bahan yang dilewatinya, maka faktor bobot radiasi neutron tiap energi berbeda-beda [2]. Tingkat energi neutron diklasifikasikan menjadi beberapa rentang energi, karena neutron memiliki jangkauan energi yang sangat besar dan distribusi energi yang bervariasi [3] [4].

\*Corresponding author:

E-mail: helmi.hakim7@gmail.com

Neutron yang dikenakan pada suatu bahan atau medium akan menimbulkan reaksi inti. Semua teknik spektrometer neutron didasarkan pada deteksi partikel sekunder, pancaran radiasi partikel bermuatan atau foton yang terjadi melalui interaksi neutron dengan inti materi [5]. Teknik aktivasi neutron dengan menggunakan detektor aktivasi berbentuk keping dapat digunakan untuk menentukan spektrum energi neutron yang disebabkan dari paparan neutron terhadap beberapa keping, dengan memperhatikan kesesuaian reaksi dalam rentang batas energi yang dimiliki material keping tersebut [6]. Pemantauan kontaminasi neutron dengan cara menentukan spektrum neutron tiap energi sangat diperlukan dalam kegiatan proteksi radiasi, karena LINAC yang dioperasikan diatas 8 MV akan mengakibatkan timbulnya partikel neutron [7].

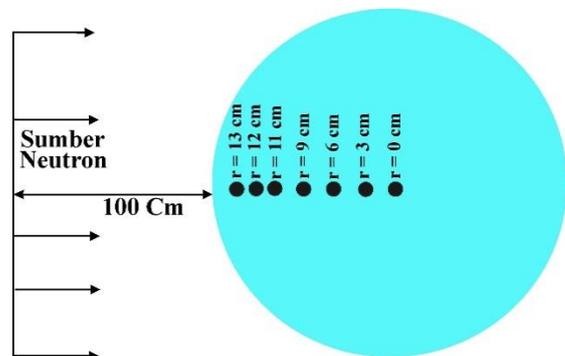
Metode *Passive Single Sphere Spectrometer* digunakan dengan detektor keping aktivasi dalam menentukan spektrum neutron di LINAC karena merupakan jenis metode pengukuran tidak langsung sehingga tingkat keamanan terhadap radiasi lebih baik jika dibandingkan dengan pengukuran menggunakan metode aktif. Penggunaan metode aktif di LINAC dalam pengukurannya juga akan dipengaruhi oleh keadaan fluks neutron pada LINAC yang tidak tetap setiap pengukuran dan waktu iradiasi yang sangat singkat dari LINAC.

**METODE PENELITIAN**

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebuah perangkat SSS yang terbuat dari bahan *Poliethylene* (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub> dengan densitas 0,96 g.cm<sup>-3</sup> ± 0,006 dan ukuran diameter 30 cm ± 0,5 yang digunakan sebagai moderator untuk termalisasi energi neutron. Alat pencacah sinar gamma menggunakan detektor HPGe (*High Purity Germanium*) tipe GEM 60-5-XLB-C-SMP digunakan sebagai pencacah keping emas yang teraktivasi. Pesawat teleterapi *Linear Accelerator* (LINAC) 15 MV merek Varian model *iX*, dan pesawat teleterapi *Linear Accelerator* (LINAC) 10 MV merek Varian model *Trilogy* buatan Varian Medical System.

Penelitian terbagi atas tiga tahapan. Pertama adalah tahap persiapan yang meliputi persiapan SSS dengan detektor keping aktivasi,

dan penentuan matrik respon. Bahan material dalam penelitian ini yang perlu dipersiapkan adalah keping emas yang digunakan sebagai detektor aktivasi berjumlah tujuh keping dengan diameter rata-rata 11,02 mm ± 0,11, tebal rata-rata 0,18 mm ± 0.005, berat rata-rata 0,34 mg ± 0.009 dengan kemurnian rata-rata 99,67% ± 0,12. Pemilihan bahan material keping emas sebagai detektor aktivasi mempertimbangkan diantaranya yaitu bentuk dari tampang lintang, konstanta peluruhan dari aktivitas induksi, sifat fisik material yang meliputi kemurnian dari suatu material tertentu [8]. Masing-masing keping tersebut dimasukkan ke dalam SSS pada posisi dengan jari-jari (0, 3, 6, 9, 11, 12, 13 cm) dari pusat bola sepanjang sumbu horisontal seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema SSS dengan multidetektor keping emas.

Matrik respon dari tiap detektor keping emas sebagai fungsi energi yang digunakan dalam pengukuran ini merupakan hasil simulasi program Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX) yang dalam bentuk grafik diperlihatkan pada Gambar 2.

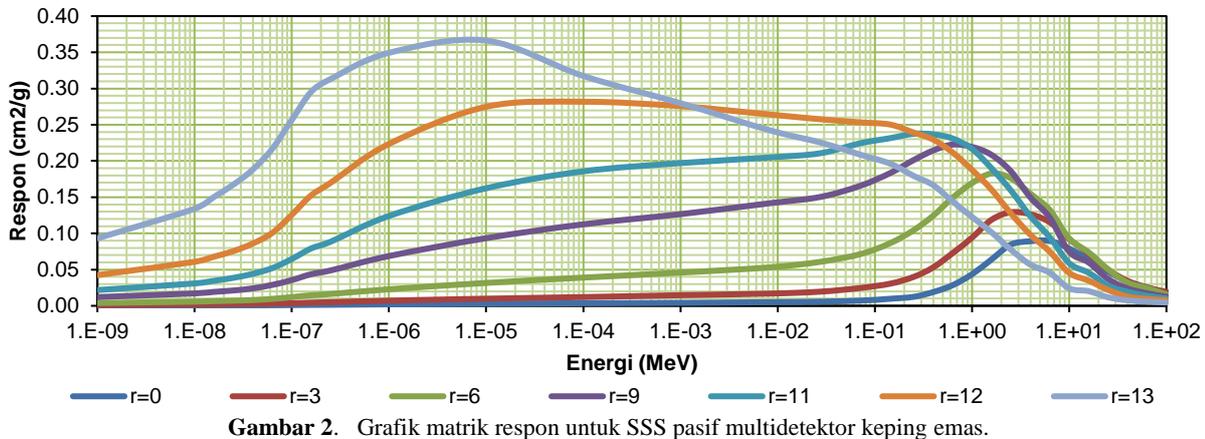
Hubungan antara nilai matrik respon  $R_{\phi}(E)(\text{cm}^2)$ , dan fluks sebagai fungsi energi atau spektrum neutron  $\Phi_E(E)(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s})$  dengan nilai cacahan yang terukur dari keping emas  $C_i$  (cps), diberikan oleh persamaan (1):

$$C_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_{\phi}(E)_i \Phi_E(E) dE \quad (1)$$

Tahap kedua adalah iradiasi yang dilakukan di sumber neutron hasil dari proses photoneutron pada LINAC menggunakan SSS yang telah dipasang detektor keping emas didalamnya diletakkan tepat di bawah gantry LINAC dengan jarak SSD 100 cm seperti pada Gambar 3. Setelah setup alat telah sesuai,

kemudian LINAC dioperasikan dengan tegangan masukan 10 MV dan 15 MV selama

15 menit, dengan laju dosis 400 MU/menit, dan luas lapangan penyinaran  $14 \times 14 \text{ cm}^2$ .



Gambar 2. Grafik matrik respon untuk SSS pasif multidetektor keping emas.



Gambar 3. Iradiasi di LINAC 10 MV dan 15 MV.

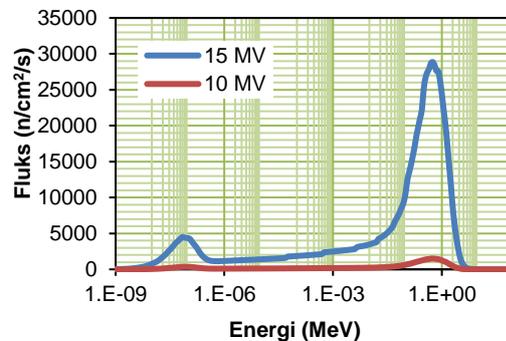
Keping emas yang sudah teraktivasi tersebut kemudian dicacah selama 600 detik untuk dibaca nilai aktivitasnya menggunakan spectrometer gamma dengan detektor HPGe. Nilai aktivitas hasil pengukuran dari masing-masing keping emas selanjutnya ditampilkan dalam bentuk spektrum dengan teknik *unfolding* menggunakan program komputer UMG 3.3. Program UMG 3.3 merupakan program komputer yang dikeluarkan oleh Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) Jerman tahun 2004. UMG (Unfolding dengan MAXED dan GRAVEL) adalah program yang digunakan untuk analisis data hasil pengukuran spectrometer menggunakan teknik unfolding [9]. Dengan menggunakan program UMG 3.3 ini, nilai laju cacah dari tujuh detektor keping aktivasi dapat diperluas (*unfolding*) menjadi bentuk spektrum.

Tahap yang terakhir adalah pengolahan data dan analisis data berupa spektrum dari pengukuran di LINAC 10 MV dan 15 MV. Hasil berupa pembahasan yang didapatkan dari proses pengolahan data dan analisis data. Pembahasan ditulis berdasar data dan

dikorelasikan sesuai referensi yang ada.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran menghasilkan data spektrum dan nilai fluks neutron di LINAC 10 MV dan 15 MV menggunakan *Passive Single Sphere Spectrometer* dengan detektor keping emas.



Gambar 4. Spektrum neutron di LINAC 10 MV dan 15 MV.

Bentuk spektrum neutron dari hasil penentuan spektrum neutron di LINAC 10 MV dan 15 MV pada Gambar 4 menunjukkan bentuk pola spektrum yang sama, tetapi nilai fluks neutron yang dihasilkan berbeda. Perbedaan nilai fluks neutron yang dihasilkan antara LINAC 10 MV dan 15 MV disebabkan oleh perbedaan nilai tegangan masukan yang digunakan, semakin tinggi tegangan masukan pada LINAC maka semakin tinggi pula nilai fluks yang dihasilkan.

Nilai fluks neutron dari data spektrum neutron pada Gambar 4 didapatkan dengan cara

menjumlahkan nilai fluks neutron berdasarkan rentang energi neutron untuk masing-masing fluks neutron di LINAC 10 MV dan 15 MV.

Tabel 1 menunjukkan perbandingan data nilai fluks tiap rentang energi neutron hasil pengukuran di LINAC 10 MV dan 15 MV.

**Tabel 1.** Perbandingan nilai fluks neutron di LINAC 10 MV dan 15 MV

Energi Neutron	Fluks 10 MV (n/cm <sup>2</sup> .s)	Fluks 15 MV (n/cm <sup>2</sup> .s)
<i>Thermal</i>	$7,22 \times 10^3 \pm 0,12 \times 10^3$	$9,30 \times 10^4 \pm 0,08 \times 10^4$
<i>Epithermal</i>	$1,28 \times 10^4 \pm 0,01 \times 10^4$	$1,63 \times 10^5 \pm 0,03 \times 10^5$
Cepat	$3,79 \times 10^4 \pm 0,01 \times 10^4$	$6,88 \times 10^5 \pm 0,18 \times 10^5$
Total	$5,78 \times 10^4 \pm 0,01 \times 10^4$	$9,44 \times 10^5 \pm 0,22 \times 10^5$

Nilai fluks neutron yang didapatkan dari hasil pengukuran di LINAC 10 MV dan 15 MV pada Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai fluks neutron paling tinggi terdapat pada rentang energi neutron cepat dengan nilai sebesar  $3,79 \times 10^4$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm 0,01 \times 10^4$  untuk LINAC 10 MV dan  $6,88 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm 0,18 \times 10^5$  untuk LINAC 15 MV, tetapi dalam hasil perhitungan nilai fluks neutron tersebut masih terdapat nilai fluks neutron pada rentang energi neutron epitermal sebesar  $1,28 \times 10^4$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm 0,01 \times 10^4$  untuk LINAC 10 MV dan  $1,63 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm 0,03 \times 10^5$  untuk LINAC 15 MV, dan juga pada rentang energi neutron termal sebesar  $7,22 \times 10^3$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm 0,12 \times 10^3$  untuk LINAC 10 MV dan  $9,30 \times 10^4$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm 0,08 \times 10^4$  untuk LINAC 15 MV. Terdapatnya nilai fluks neutron pada rentang energi neutron epitermal dan termal disebabkan karena adanya hamburan balik dari beberapa partikel neutron yang mengenai komponen LINAC itu sendiri seperti meja pasien atau lantai, dan dinding ruang *treatment*, sehingga sumber neutron yang berenergi cepat menjadi turun karena akibat hamburan tersebut. Hamburan balik merupakan proses hamburan yang terjadi secara lenting sempurna, yaitu proses tumbukan partikel neutron terhadap inti atom, setelah tumbukan arah partikel neutron dibelokkan dari arah semula dengan membentuk sudut  $\theta$  dan tidak mengalami eksitasi baik sesudah maupun setelah reaksi tumbukan pada neutron atau inti atom bahan [10].

Tabel 1 juga menunjukkan perbedaan nilai total fluks neutron yang dihasilkan dari LINAC 15 MV sangat tinggi dengan nilai sebesar  $9,44 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm 0,22 \times 10^5$  yang diukur dengan luas lapangan 14 x 14 cm<sup>2</sup>, jarak SSD 100 cm, waktu iradiasi 15 menit, laju dosis 400

MU/menit. Sedangkan untuk LINAC yang dioperasikan dengan tegangan masukan 10 MV dengan waktu iradiasi, luas lapangan, laju dosis dan jarak SSD yang sama dengan LINAC 15 MV, didapatkan nilai fluks total lebih besar yaitu  $5,78 \times 10^4$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm 0,01 \times 10^4$ . Perbedaan nilai fluks neutron total yang dihasilkan ini disebabkan oleh perbedaan nilai tegangan masukan pada LINAC, karena semakin tinggi tegangan masukan pada LINAC maka fluks neutron yang dihasilkan semakin banyak. Hal ini sesuai dengan data pengukuran fluks neutron oleh Domingo dkk. Tahun 2010 dari beberapa variasi tegangan masukan dengan jarak SSD ke isosenter 50 cm yaitu untuk LINAC dengan tegangan masukan 15 MV merek Elekta Synergy menghasilkan fluks  $2,13 \times 10^6$  n/cm<sup>2</sup>.Gy  $\pm 0,03 \times 10^6$ , LINAC dengan tegangan masukan 18 MV merek Siemens Primus menghasilkan fluks  $4,63 \times 10^6$  n/cm<sup>2</sup>.Gy  $\pm 0,04 \times 10^6$ , dan LINAC dengan tegangan masukan 23 MV merek Siemens Mevatron menghasilkan fluks  $1,28 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>.Gy  $\pm 0,01 \times 10^7$  [11].

Penentuan spektrum neutron di LINAC 10 MV dan 15 MV tersebut dapat digunakan sebagai informasi atau referensi dalam menentukan kontaminasi neutron tiap energi neutron yang ditimbulkan dari komponen utama di kepala LINAC seperti kolimator primer, filter dan kolimator sekunder melalui proses photoneutron [12]. Penentuan kontaminasi neutron dari spektrum tersebut digunakan sebagai informasi didalam menentukan dosis tambahan akibat kontaminasi neutron secara akurat, sebagai informasi dalam menentukan efektifitas pembuatan desain *shielding* neutron, dan juga sebagai perencanaan proteksi radiasi untuk pekerja atau pihak-pihak yang terkait dalam pengoperasian LINAC.

### KESIMPULAN

Spektrum neutron di LINAC 10 MV dan 15 MV menghasilkan bentuk dan pola spektrum yang sama, tetapi untuk nilai fluks neutron yang dihasilkan dari LINAC 10 MV lebih kecil dengan fluks neutron total  $5,78 \times 10^4$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm$   $0,01 \times 10^4$ , dari pada LINAC 15 MV dengan fluks neutron total  $9,44 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>.s  $\pm$   $0,22 \times 10^5$ , sehingga jika LINAC dioperasikan dengan tegangan masukan yang semakin tinggi, maka fluks neutron yang dihasilkan juga semakin banyak.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Allardice, A. (2014). Neutron Production and Transport at a Medical Linear Accelerator. *Thesis*. Department of Environmental and Radiological Health Sciences. Colorado State University Colorado.
- [2] Barquero, R., R. Mendez, H. R. Vega-Carrillo, M. P. I. Iiguez dan T. M. Edwards. (2005). Neutron Spectra and Dosimetric Features around an 18 Mv Linac Accelerator. *Health Physics*. **88**(1): 48-58.
- [3] Ovalle, S. A. M. (2013). *Neutron Dose Equivalent in Tissue Due to Linacs of Clinical Use*. InTech. Rijeka, Croatia.
- [4] Hyne, J. (2014). *Resume of Non-Technical Guide to Petroleum Geology Vol 7*. Geopangea Research Group Indonesia.
- [5] Futse, M. J. G., C. Domingo dan K. Amgarau. (2010). Neutron Spectrometry in Complex N-Y Fields: Application to Linac and Pet Facilities. *Thesis*. Facultat de Ciencies. Universitat Autònoma de Barcelona. Spain.
- [6] Panjeh, H., R. I. Najafabadi, M. Abbasi dan J. Kettler. (2012). Direct Simulation Monte Carlo Code for Time Dependent Foil Activation Measurements. *International Journal of Science and Advanced Technology*. **3**(12): 1-8.
- [7] Knoll, G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement. Fourth edition*, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, USA.
- [8] Chen, K. L., E. E. Klein, S. K. Loyalka dan W. H. Miller. (2011). Neutron Exposure from Electron Linear Accelerators and a Proton Accelerator: Measurements and Simulations. *Dissertation*. Faculty of the Graduate School. University of Missouri. Columbia.
- [9] Reginatto, M. (2004). *UMG Package. Version 3.3*. Nuclear Agency Energy. Boulogne-Billancourt, France.
- [10] Turner, J. E. (2007). *Atoms, Radiation, and Radiation Protection. 3rd, Completely Revised and Enlarged Edition*, Wiley-VCH. Weinheim, Germany.
- [11] Domingo, C., M. J. Garcia-Futse, E. Morales, K. Amgarau, J. A. Terron, J. Rosello, L. Brualla, L. Nunez, R. Colmenares, F. Gomez, G. H. Hartman, F. Sanchez-Doblado dan F. Fernandez. (2010). Neutron Spectrometry and Determination of Neutron Ambient Dose Equivalents in Different Linac Radiotherapy Rooms. *Radiation Measurements*. **45**(10): 1391–1397.
- [12] NCRP. (1984). *Neutron Contamination from Medical Electron Accelerator*. Report No.079. Bethesda. USA.