

# Perkiraan Dosis Ekuivalen Neutron Termal pada Pasien Radioterapi Linac 15 MV

Fatimah Kunti Hentihu<sup>1</sup>, Johan A.E. Noor<sup>1</sup>, Bunawas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika FMIPA Univ. Brawijaya

<sup>2</sup>PTKMR-BATAN Jakarta Selatan

Email:fatimah.hentihu@gmail.com

## Abstract

Penggunaan linac dengan energi foton lebih dari 10 MV akan menghasilkan neutron dari reaksi fotoneutron antara foton yang dihasilkan dengan bahan-bahan di sekitar kepala linac. Kami telah melakukan penelitian dengan menggunakan pesawat linac 15 MV untuk mengukur dosis ekuivalen neutron termal di dalam tubuh dengan menggunakan sebuah fantom antropomorfik berbahan polietilen yang disisipi detektor CR-39 beradiasi BN-1. Ketika neutron cepat masuk ke dalam fantom dan berinteraksi, neutron cepat akan mengalami moderasi dan termalisasi menjadi neutron termal. Neutron termal tersebut dideteksi dengan detektor CR-39 beradiasi BN-1 karena reaksi antara neutron termal dengan boron menghasilkan partikel alfa yang akan berinteraksi dengan detektor CR-39 dan menghasilkan jejak. Sebelum digunakan, detektor dikalibrasi terlebih dahulu dengan sumber neutron <sup>252</sup>Cf untuk memperoleh persamaan kalibrasi  $y = 164x$ . Sensitivitas detektor CR-39 pada penelitian ini sebesar 164 jejak/cm<sup>2</sup>.μSv. Dosis ekuivalen neutron termal dari penyinaran linac dengan dosis terapi 2 Gy dan 3 Gy sebesar 52 - 206 μSv dengan ketidakpastian ±5% dan 78-309 μSv dengan ketidakpastian ±4%. Variasi dosis tersebut berhubungan dengan letak titik (kedalaman dan jarak dari isosenter penyinaran) dan jenis bahan pada fantom.

Kata kunci : Linac, radioterapi, CR-39, boron *converter* (BN-1), neutron termal, dosis ekuivalen

## Pendahuluan

Beberapa jenis mesin penghasil radiasi digunakan dalam radioterapi, seperti mesin cobalt dan mesin cesium yang menghasilkan radiasi gamma, serta mesin linac (*linear accelerator*) yang menghasilkan sinar X. Foton yang dihasilkan dari linac memiliki rentang energi 4 MV hingga 25 MV [5]. Pada terapi untuk jenis tumor atau kanker yang letaknya lebih dalam, maka digunakan foton berenergi tinggi [7,10]. Pengoperasian linac dengan energi foton lebih dari 10 MV memungkinkan terjadinya emisi neutron dari reaksi fotoneutron yang dihasilkan karena adanya interaksi antara sinar X dengan material yang memiliki nilai Z tinggi pada komponen kepala linac seperti target, filter, kolimator, serta komponen lain [2,5]. Emisi neutron tersebut terutama dihasilkan pada komponen tungsten target pada linac yang merupakan tempat terjadinya konversi elektron berenergi tinggi menjadi sinar X [9].

Ketika neutron tersebut masuk ke dalam tubuh pasien ataupun fantom, neutron akan mengalami moderasi dan termalisasi [1] dan menjadi neutron termal yang dapat dideteksi oleh detektor polyallyldiglycol carbonate (PADC) dengan nama dagang CR-39 yang termasuk ke dalam jenis detektor jejak nuklir. Jumlah jejak yang dihasilkan pada CR-39 sebagai akibat dari interaksi antara neutron termal dengan atom-atom pada CR-39 dapat diamati setelah melalui proses etsa. Dosis ekuivalen neutron kemudian dapat diperkirakan dari jumlah jejak yang terbentuk dengan menggunakan faktor

kalibrasi yang diperoleh dengan menggunakan sumber neutron standar [8].

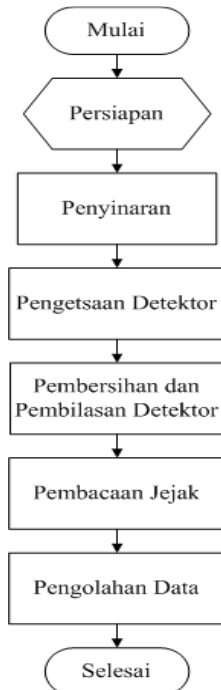
## Metode

Tahap persiapan meliputi pembuatan fantom dan persiapan detektor. Fantom yang digunakan dalam penelitian ini terdapat dua macam, yaitu fantom slab untuk penyinaran kalibrasi dan fantom antropomorfik untuk penyinaran linac. Fantom tersebut dibuat dari polietilen yang memiliki densitas sebesar 0,92 g/cm<sup>3</sup>. Fantom slab yang digunakan untuk kalibrasi berukuran 30 cm × 30 cm × 15 cm (Gambar 2a). Sementara fantom antropomorfik dibuat berdasarkan ukuran standar manusia Indonesia pada rentang usia 40-59 tahun dengan rongga paru-paru terbuat dari kayu berdensitas rendah (Gambar 2b). Pada fantom antropomorfik dibuat beberapa lubang yang digunakan sebagai tempat untuk meletakkan detektor yang digunakan dan dianggap mewakili beberapa organ dalam tubuh, seperti pada Tabel 1.

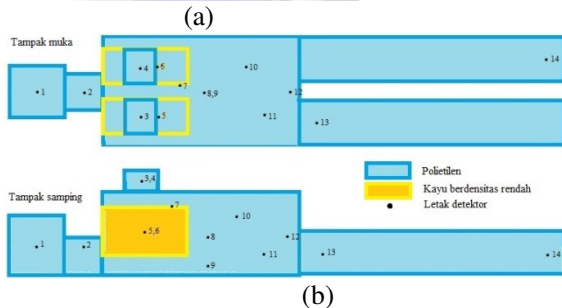
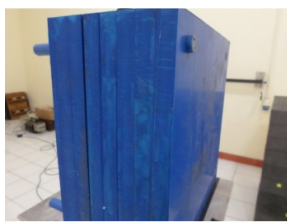
Detektor jejak nuklir CR-39 dipotong dengan ukuran 2 × 1 cm<sup>2</sup>. Sementara boron *converter* BN-1 yang berbentuk lembaran film dipotong dengan ukuran 1 × 1 cm<sup>2</sup>. Bagian dari BN-1 yang merupakan lapisan boron alami ditempelkan pada bagian aktif dari detektor CR-39.

Detektor yang telah siap kemudian disinari di fasilitas neutron termal dalam Laboratorium Neutron PTKMR. Detektor disinari dengan sumber neutron standar <sup>252</sup>Cf. Sebelum dilakukan penyinaran linac terdapat tahapan pra-penyinaran

linac yang dilakukan dalam 2 tempat, yaitu ruang CT-scan dan ruang TPS (*Treatment Planning System*). Penyirana linac pada fantom dilakukan sesuai perencanaan yang telah dibuat dalam ruang TPS sebelumnya. Penyinaran dilakukan dengan linac 15 MV dan laju dosis 400MU/menit, di mana 1 MU sama dengan 1 cGy dan dengan dosis target 2 Gy serta 3 Gy. Setelah dilakukan penyinaran, kemudian detektor dietsa



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian.



Gambar 1 (a) Fantom slab dalam penelitian ini berdasarkan IAEA [4]; dan (b) Skema fantom antropomorfik serta letak detektor dalam penelitian ini dengan menggunakan ukuran standar manusia Indonesia pada rentang usia 40-59 tahun [3].

Tabel 1 Korelasi titik pengukuran pada fantom dengan organ pada tubuh

Organ	Titik
Kepala	1
Leher	2
Mammae	3, 4
Paru-paru	5, 6
Toraks	7
Isosenter	8
Tulang belakang	9
Abdomen	10, 11, 12
Kaki kanan bagian atas	13
Ujung kaki kiri	14

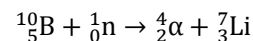
Detektor dietsa dengan larutan NaOH 6,25 N dan dipanaskan dalam oven bersuhu 70 °C selama 7 jam. Detektor yang telah dietsa, kemudian dibersihkan dengan tujuan untuk membersihkan sisa larutan NaOH yang menempel pada detektor. Setelah dietsa dan dikeringkan, kemudian dilakukan pembacaan jejak. Pembacaan jejak dilakukan dengan perbesaran 400x dan 25 lapangan pandang. Data hasil pembacaan jejak dikonversi dengan menggunakan persamaan 1 dan dirata-rata serta dikurangi jejak *background*. Setelah jumlah jejak dikonversi menjadi satuan jejak/cm<sup>2</sup>, kemudian dibuat kurva kalibrasi dengan bantuan software Microsoft Excel 2010. Sensitivitas diperoleh dari persamaan pada kurva kalibrasi, yaitu dengan menentukan besar slope ( $\frac{y}{x}$ ), dimana y adalah jumlah jejak (jejak/cm<sup>2</sup>.μSv) dan x adalah besar dosis ekuivalen neutron termal (μSv). Dosis ekuivalen neutron termal pada fantom antropomorfik yang telah dipasang detektor CR-39 dengan radiator BN-1 dan disinari dengan mesin linac 15 MV dengan dosis target 2 Gy dan 3 Gy, dapat ditentukan berdasarkan jumlah jejak/cm<sup>2</sup> dan sensitifitas (S) detektor dengan persamaan 2.

$$J \left( \frac{\text{jejak}}{\text{cm}^2} \right) = J \left( \frac{\text{jejak}}{\text{field}} \right) \times \left( \frac{1}{4,675 \times 10^{-4}} \right) \left( \frac{\text{field}}{\text{cm}^2} \right) \quad (1)$$

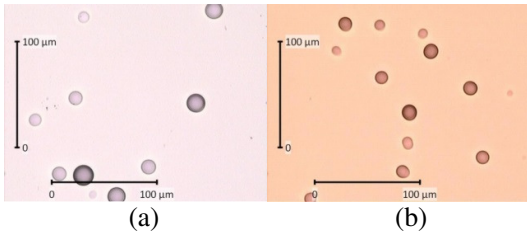
$$D_T = \frac{J_T - J_B}{S} = \frac{J_N}{S} \quad (2)$$

## Hasil dan Pembahasan

Reaksi yang terjadi ketika neutron termal berinteraksi dengan atom boron, yaitu



atau dapat disingkat menjadi  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ . Partikel alfa tersebut kemudian berinteraksi dengan atom-atom pada detektor CR-39, sehingga menghasilkan jejak (Gambar 3).



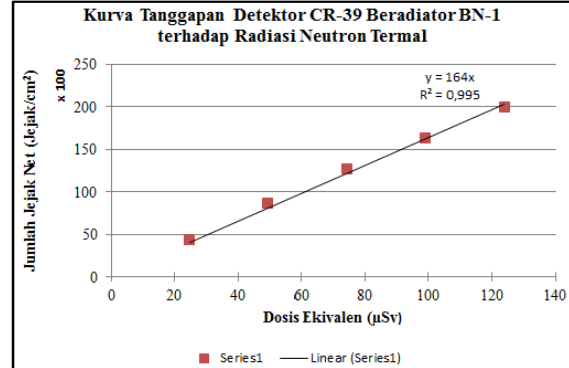
Gambar 3. Jejak yang tampak pada detektor CR-39 dengan konverter boron (a) penyinaran kalibrasi dengan sumber ( $^{252}\text{Cf}$ ) dan (b) penyinaran linac 15 MV.

Bentuk dan ukuran dari jejak yang tampak pada detektor CR-39 dipengaruhi oleh besar energi partikel radiasi. Partikel yang berenergi tinggi menghasilkan jejak yang kecil, sementara sebaliknya energi rendah menghasilkan jejak berukuran lebih besar. Selain energi, sudut datang partikel alfa terhadap detektor CR-39 juga mempengaruhi bentuk jejak yang dihasilkan dan terdapat sebuah sudut limit atau sudut kritis dimana jejak dapat dihasilkan.

Sebagian besar neutron yang dihasilkan dari linac memiliki rentang energi 1-2 MeV [6], sehingga reaksi  $(n, \alpha)$  pada boron tidak terjadi. Ketika neutron tersebut memasuki fantom berbahan polietilen dengan rumus  $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$ , maka neutron kemudian berinteraksi dengan atom-atom karbon dan hidrogen. Interaksi tersebut berupa hamburan inelastis yang menghasilkan neutron berenergi lebih rendah dan radiasi gamma. Neutron tersebut dapat dikatakan mengalami moderasi dan termalisasi hingga menjadi neutron termal dengan energi 0,025 eV. Neutron termal tersebut yang kemudian dapat berinteraksi dengan atom boron dan menghasilkan partikel alfa yang kemudian dapat dideteksi oleh detektor CR-39 yang tidak sensitif terhadap radiasi gamma.

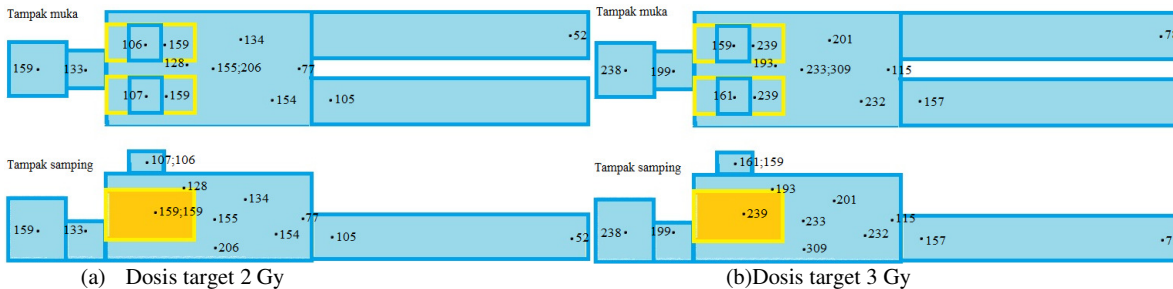
Dari hasil pembacaan jejak pada penyinaran kalibrasi, dapat dibuat kurva tanggapan detektor CR-39 beradiatori BN-1 terhadap radiasi neutron termal. Kurva tanggapan tersebut menunjukkan hubungan antara dosis ekuivalen neutron termal dengan jumlah jejak yang dihasilkan pada detektor CR-39. Kurva tanggapan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan kurva tersebut, terlihat bahwa semakin besar dosis yang diberikan maka jumlah jejak yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini dikarenakan jumlah neutron yang berinteraksi dengan radiator BN-1 atau boron konverter juga semakin besar. Persamaan garis yang dihasilkan pada kurva juga menunjukkan kemiringannya. Kemiringan atau *slope* tersebut dapat dilihat dari nilai  $\frac{y}{x}$  yaitu sebesar 164. Sensitivitas detektor yang diperoleh dalam penelitian ini adalah sebesar  $164 \text{ jejak/cm}^2 \cdot \mu\text{Sv}$



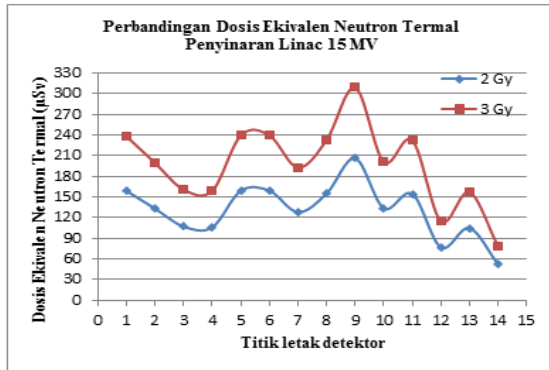
Gambar 4. Kurva tanggapan detektor CR-39 beradiatori BN-1 terhadap radiasi neutron termal

Setelah penyinaran linac dilakukan, detektor kemudian dietsa dan dilakukan pembacaan jejak. Sama halnya seperti pada penyinaran kalibrasi, pembacaan jejak juga dilakukan pada 25 *field* yang dipilih secara acak. Jumlah jejak tiap *field* tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan jejak/cm<sup>2</sup> menggunakan persamaan 1 dan kemudian dirata-rata. Jumlah jejak rata-rata kemudian dikurangi dengan jumlah jejak *background* dan menghasilkan jumlah jejak net. Jumlah jejak net tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan besar dosis ekuivalen neutron dengan menggunakan persamaan 2. Besar dosis ekuivalen neutron pada masing-masing penyinaran linac dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Dosis ekuivalen neutron termal dalam tubuh fantom antropomorfik dalam satuan  $\mu\text{Sv}$  dengan ketidakpastian (a)  $\pm 5\%$  dan (b)  $\pm 4\%$

Dosis ekuivalen neutron termal yang diperoleh dari penyinaran mesin linac 15 MV dengan dosis target 2 Gy dan 3 Gy berkisar antara 52 - 206  $\mu\text{Sv}$  dengan ketidakpastian  $\pm 5\%$  dan antara 78 - 309  $\mu\text{Sv}$  dengan ketidakpastian  $\pm 4\%$ . Dosis ekuivalen tertinggi pada tulang belakang dan terendah pada ujung kaki kiri. Variasi dosis tersebut dipengaruhi oleh letak titik pada fantom.



Gambar 6 Konsistensi rasio dosis ekuivalen neutron termal penyinaran linac 15 MV antara dosis target 2 Gy dan 3 Gy.

Dari gambar di atas terlihat bahwa perbandingan atau rasio dosis ekuivalen neutron

termal pada penyinaran kedua dengan dosis target sebesar 3 Gy terhadap penyinaran pertama dengan dosis target sebesar 2 Gy adalah konsisten dengan besar rasio sekitar 1,5 untuk semua titik pengukuran. Hal tersebut sama dengan penambahan dosis target yang menjadi 1,5 kali dosis target penyinaran pertama. Pemberian dosis penyinaran kedua menjadi 1,5 kali penyinaran pertama menyebabkan peningkatan dosis ekuivalen neutron termal dengan rasio yang sama atau dengan kata lain peningkatan dosis ekuivalen neutron termal sebanding dengan dosis penyinaran yang diberikan.

## Kesimpulan

Detektor CR-39 dengan radiator boron tipe BN-1 berfungsi dengan baik untuk mendeteksi neutron termal. Sensitivitas detektor didapatkan sebesar 164 jejak/ $\text{cm}^2\mu\text{Sv}$ . Dosis ekuivalen neutron termal yang diperoleh dari penyinaran mesin linac 15 MV dengan dosis target 2 Gy dan 3 Gy berkisar antara 52-206  $\mu\text{Sv}$  dengan ketidakpastian  $\pm 5\%$  dan antara 78-309  $\mu\text{Sv}$  dengan ketidakpastian  $\pm 4\%$ . Variasi dosis tersebut dipengaruhi oleh letak titik pada fantom.

## Daftar Pustaka

- [1] Benites-Rengifo, J. L. dan H. R. Vega-Carrillo. 2014. Neutron Dosimetry in Solid Water Phantom. *AIP Conference Proceeding*. 1626: 114-116
- [2] Fujibuchi, T., S. Obara, M. Nakajima, N. Kitaura dan T. Sato. 2014. Estimation of Neutron and Gamma Radiation Doses Inside The Concrete Shield Wall for 10 and 15 MV Medical Linear Accelerators. *Progress in Nuclear Science and Technology*. 4: 280-284.
- [3] IAEA. 1998. Compilation of Anatomical, Physiological and Metabolic Characteristics for a Reference Asian Man Volume 2: Country Reports. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [4] IAEA. 2000. Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments. Safety Report Series No. 16. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [5] Latifah, R., J. A. E. Noor dan B. . 2013. Pengukuran Flux Neutron Termal pada Ruang Treatment Linac iX 15 MV. *Natural B*. 2(2).
- [6] Liu, J. C., K. R. Kase, X. S. Mao, W. R. Nelson, J. H. Kleck dan S. Johnson. 1997. Calculation of Photoneutrons from Varian Clinac Accelerators and Their Transmissions in Materials. Sz
- [7] Reft, C. S., R. Runkel-Muller dan L. Myriantopoulos. 2006. In Vivo and Phantom Measurement of The Secondary Photon and Neutron Doses for Prostate Patients Undergoing 18 MV IMRT. *Medical Physics*. 33(10).
- [8] Sahoo, G. S., S. Paul, S. P. Tripathy, S. C. Sharma, S. Jena, S. Rout, D. S. Joshi dan T. Bandyopadhyay. 2014. Effect of Neutron Irradiation on Optical and Chemical Properties of CR-39: Potential Application in Neutron Dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*. 94: 200-205.
- [9] Szydłowski, A., A. Jaskola, A. Malinowska, S. Pszona, A. Wysocka-Rabin, A. Korman, K. Pytel, R. Prokopowicz, J. Rostkowska, W. Bulski dan M. Kuk. 2012. Application of Nuclear Track Detectors as Sensors for Photoneutrons Generated by Medical Accelerators. *Radiation Measurement*. XXX: 1-4.
- [10] Takam, R., E. Bezak, L. G. Marcu dan E. Yeoh. 2011. Out of Field Neutron and Leakage Photon Exposures and The Associated Risk of Second Cancers in High Energy Photon Radiotherapy: Current Status. *Radiation Research*. 176.