

Studi Distribusi Fluks Neutron Termal dan Energi yang Dihasilkan Linac Menggunakan Detektor CR-39 pada Medium Air

Kurnia Nur Widyanti^{1*}, Chomsin S. Widodo², Bunawas³

¹⁾ Program Magister Ilmu Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya

²⁾ Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya

³⁾ Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, BATAN Indonesia

Diterima 01 Maret 2018, direvisi 27 Maret 2018

ABSTRAK

Operasi Linac diperlukan dalam kegiatan radioterapi. Akan tetapi jika Linac dioperasikan lebih dari 8 MV dapat menimbulkan radiasi tambahan berupa neutron, sekaligus pemicu pembentuk kanker sekunder. Penelitian dilakukan untuk menentukan sebaran fluks neutron termal dan tanggapan energi pada jejak. Salah satu metode untuk mendeteksi neutron yaitu menggunakan detektor jejak nuklir. Pengukuran dilakukan menggunakan detektor CR-39 yang dilapisi radiator Boron. Sejumlah detektor diletakkan pada permukaan fantom bola dan dimasukkan kedalam fantom berukuran $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. Penyinaran dilakukan dengan menempatkan fantom di bawah gantry Linac dengan jarak SSD 100cm. Setelah penyinaran, kemudian dilakukan etsa. Hasil pengukuran menunjukkan distribusi fluks neutron termal menyebar ke segala arah. Nilai fluks neutron Linac 10 MV bervariasi, mulai posisi detektor 0° sebesar $1.637 \times 10^3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ dan mulai menurun pada posisi detektor 135° sebesar $1.285 \times 10^3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. Linac 15 MV tertinggi di posisi detektor 0° sebesar $10.723 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ dan menurun pada posisi 135° sebesar $5.142 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. Hal ini membuktikan bahwa semakin jauh dari sumber semakin berkurang nilai fluks neutron termal akibat proses tumbukan. Sedangkan Linac 10 MV dan 15 MV menghasilkan rentang diameter berkisar 8.21-16.75 (μm) dan 9.21-17.45 (μm), dengan nilai tanggapan energi 0.5-3.5 MeV. Semakin besar tanggapan energi, semakin kecil diameter begitu juga sebaliknya, hal ini diakibatkan pengaruh penetrasi pada kedalaman jarak yang mengakibatkan jejak semakin kecil.

Kata kunci: Linac, neutron, fluks neutron termal.

ABSTRACT

Linac surgery is required in radiotherapy activities. However, if Linac operated more than 8 MV can cause additional radiation of neutrons, as well as triggers forming secondary cancer. The study was conducted to determine the distribution of thermal neutron flux and energy responses on the trace. One method to detect neutrons is to use a nuclear trace detector. Measurements were made using a CR-39 detector coated with a Boron radiator. A number of detectors were placed on the surface of the sphere and entered into a $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ fantom. Irradiation is done by placing fantom under Linac gantry with 100cm SSD distance. After irradiation, then etching. The results of the measurements showed that the distribution of thermal neutron fluxes spread in all directions. Linac 10 MV neutron flux value varies, starting at 0° of $1,637 \times 10^3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ and decrease at 135° of $1.285 \times 10^3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. The highest Linac 15 MV at detector position 0° of $10.723 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ and decreased at 135° of $5.142 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$. This proves that the farther from the source the less the thermal neutron flux value due to the collision process. While Linac 10 MV and 15 MV produce range of diameter ranging from 8.21-16.75 (μm) and 9.21-17.45 (μm), with energy response value 0.5-3.5 MeV. The larger the energy response, the smaller the diameter and vice versa, this is due to the effect of penetration on the depth of the distance resulting in smaller track.

Keywords: Linac, neutron, thermal neutron flux

*Corresponding author:

E-mail: kurnianurwidyanti12@gmail.com

PENDAHULUAN

Perkembangan perangkat terapi di bidang radiologi dan kedokteran mengalami kemajuan, salah satunya adalah Linac (*linier accelerator*) yang biasa digunakan dalam terapi penyakit kanker [1]. Keuntungan perangkat terapi Linac yaitu tidak menggunakan sumber radioaktif secara langsung sehingga aman saat penggunaan dan dijadikan alternatif pengganti alat terapi radiasi kobalt dan cesium [2]. Tetapi penggunaan Linac tidak terlepas dari keberadaan neutron, terutama jika Linac dioperasikan diatas 8 MV. Menurut hasil penelitian sebelumnya, semakin besar Linac yang dioperasikan, maka semakin besar pula neutron yang terdeteksi [3]. Meskipun hanya 1% di ruang terapi, tetapi hasil reaksinya menimbulkan aktivasi disekitar ruangan sehingga menjadi radioaktif [4]. Reaksi inilah yang berbahaya bagi tubuh selama proses terapi karena dapat menyebabkan munculnya resiko kanker sekunder.

Akibat radiasi ini, kemungkinan resiko kanker sekunder yang muncul di luar area *cancer* semakin besar [5]. Paparan radiasi ditengarai memiliki andil besar terhadap pembentukan kanker, karena hamburannya yang bersifat random, sehingga organ sehat pun dapat terkena dampak radiasi ini. Terlebih lagi arah paparan yang terdistribusi adalah acak, sehingga peluang tersebarnya radiasi belum dapat dipastikan [6].

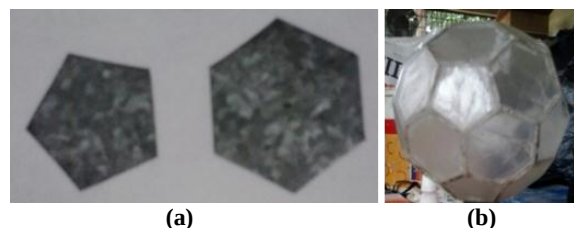
Adanya fakta bahwa kemunculan neutron sangat sulit dideteksi menyebabkan penelitian ini perlu dilakukan. Pendekatan yang cocok untuk melihat sebaran neutron termal yaitu menggunakan detektor jejak nuklir CR-39 dengan penambahan radiator Boron. Detektor jejak nuklir dapat mengukur neutron termal berdasarkan jejak yang tertinggal (laten) akibat ionisasi dari proton hampur pada bahan detektor [7]. Maka dari itu untuk melihat sebaran hamburan radiasi digunakanlah fantom berbentuk bola. Tujuannya adalah untuk melihat sebaran yang terdeteksi detektor di masing-masing titik, karena sifat radiasi tidak dapat diamati secara kasat mata, dan hanya bisa terhambur kesegala arah tanpa diketahui daerah mana yang terkena paparan paling besar. Sedangkan untuk mengetahui tanggapan energi dapat dilakukan dengan mengukur diameter bentuk jejak, mengingat masing-masing bentuk jejak mewakili nilai energi yang dipancarkan radiasi, sehingga nilai energi neutron yang terhambur dapat diestimasi.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, analisis distribusi fluks neutron termal dan tanggapan energi perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh sebaran fluks neutron termal, dan melihat pengaruh bentuk diameter jejak terhadap tanggapan energi radiasi. Karakteristik pengukuran dilakukan berdasarkan input Linac yang digunakan di beberapa rumah sakit menggunakan energi tinggi (10 MV dan 15 MV). Sehingga akan dilakukan analisis sebaran fluks pada medium air sebagai pereflektor hamburan.

METODE PENELITIAN

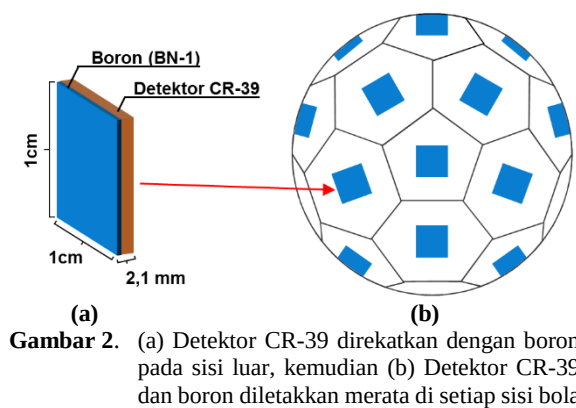
Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap diantaranya tahap pertama yaitu mempersiapkan bola, detektor, dan fantom air (*water phantom*). Tahap kedua melakukan iradiasi di laboratorium neutron dan iradiasi Linac di rumah sakit. Tahap ketiga mengolah dan menganalisis data yang diperoleh.

Pemilihan bahan untuk pembuatan bola mempertimbangkan densitas jenis bahan yang mirip dengan densitas tubuh untuk penyinaran kalibrasi. Kisaran densitas untuk bahan yang memungkinkan adalah $0.9 - 1.1 \text{ g/cm}^3$ [8]. Sedangkan, polyetilen memiliki densitas 0.92 g/cm^3 sehingga bahan ini cocok untuk pengujian radiasi. Bola tempat detektor didesain seperti bola sepak pada umumnya dengan bahan polyetilen yang bertujuan untuk memperoleh perputaran sudut selain sebagai tempat peletakkan detektor. Ukuran bola ini disesuaikan dengan maal atau cetakan yang telah dibuat terlebih dahulu. Cetakan yang dibentuk berukuran segi 5 menghasilkan sudut 72° dan ukuran segi 6 menghasilkan sudut 120° (Gambar 1a). Sebanyak 12 buah cetakan segi 5 dan 21 buah cetakan segi 6 dibutuhkan untuk mendapatkan 1 buah bola. Bola yang akan dibentuk berukuran $d = 8\text{cm}$ (Gambar 1 b).

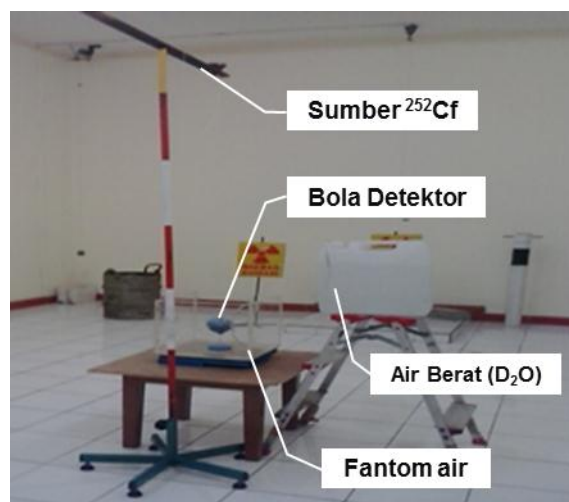


Gambar 1. (a) Maal atau cetakan sisi segi 5 dan segi 6 dan (b) Bola akrilik yang sudah dibentuk dan digunakan sebagai tempat detektor

Selanjutnya detektor CR-39 disiapkan dengan ukuran $1 \times 1 \text{ cm}^2$ kemudian direkatkan pada lapisan Boron (Gambar 2). Perekatan ini bertujuan untuk mempercepat terbentuknya reaksi neutron termal akibat interaksi radiasi dengan neutron. Detektor CR-39 yang telah merekat pada lapisan Boron, kemudian ditempelkan pada permukaan bola hingga merata keseluruh bagian. Hal ini maksudkan agar distribusi neutron terdeteksi di setiap detektor. Selanjutnya bola diletakkan di dalam fantom air berukuran $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ untuk dilakukan kalibrasi dengan menggunakan sumber standar. Kemudian keduanya disusun dan disusun dengan perangkat lain diantaranya sumber ^{252}Cf , fantom air, dan air berat (D_2O) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3 digunakan air berat (D_2O) yang berfungsi sebagai pendingin dan penyerap neutron.



Gambar 2. (a) Detektor CR-39 direkatkan dengan boron pada sisi luar, kemudian (b) Detektor CR-39 dan boron diletakkan merata di setiap sisi bola



Gambar 3. Ilustrasi peletakan fantom beserta peralatan lainnya.

Tahap kedua yaitu iradiasi menggunakan sumber standar ^{252}Cf untuk mendapatkan kurva kalibrasi, dilanjutkan dengan iradiasi

menggunakan Linac yang diletakkan tepat di bawah *gantry* Linac dengan jarak 100 cm dan disinari dengan dosis 1200 MU atau setara dengan 3 Gy, selama beberapa $\pm 2,9$ menit. Jarak SSD 100 cm dan luas lapangan $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Hasil jejak yang diperoleh kemudian disubstitusi ke dalam persamaan kurva kalibrasi untuk mengetahui dosis neutronnya.

Hasil penyinaran dari kalibrasi maupun dari linac harus melalui proses etsa menggunakan larutan kimia NaOH 6.25 N untuk memperjelas tampilan jejak, Selanjutnya digunakan mikroskop optik untuk melihat jejak. Pembacaan jejak dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran $400\times$. Jejak dihitung pada luasan 25 *field* disekitar pusat detektor. Sedangkan untuk jejak *background* dihitung dari seluruh luasan permukaan detektor.

Tahap ketiga yaitu pengolahan data menggunakan beberapa persamaan berikut:

1. Konversi satuan jumlah jejak 25 *field* (lapangan pandang) secara acak kemudian diambil rata-rata dan dikonversi menggunakan persamaan (1).

$$J = \left(\frac{125 \times 625 \text{ lapangan pandang}}{25 \text{ lapangan pandang}} \right) \quad (1)$$

2. Kurva kalibrasi dibuat dengan menggunakan variabel dosis (sumbu X) dan jumlah jejak (sumbu Y) untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variabel bebas dan terikat. Sehingga dapat diketahui hubungan koefisien regresi (R) diantara keduanya dan menentukan limit deteksi minimum (LDM) dari detektor untuk mengetahui jejak yang terbentuk berasal dari sumber radioaktif atau tidak.

3. Melakukan perhitungan konversi jumlah jejak ke nilai dosis digunakan persamaan (2)

$$\text{Dosis (mSv)} = \frac{\text{jejak (cm}^2\text{)}}{\text{Sensitifitas detektor}} \quad (2)$$

4. Melakukan perhitungan laju dosis ekuivalen dan fluks neutron termal, serta menggunakan program *track_vision* untuk mengestimasi energi.

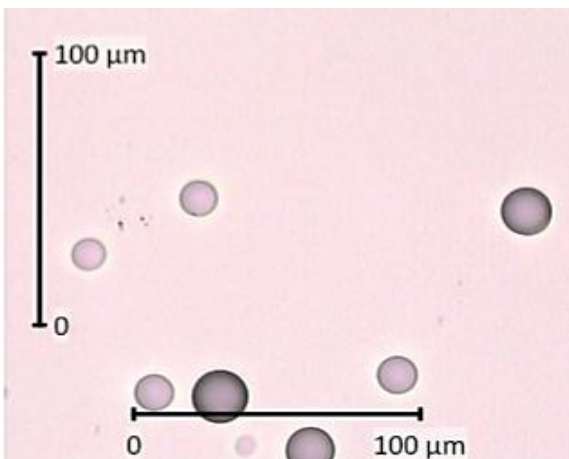
$$\dot{H}(\mu\text{Sv/s}) = \frac{\text{Laju Dosis Standar (MU/s)}}{\text{Dosis (MU)}} \times H(\mu\text{Sv}) \quad (3)$$

$$\text{Fluks } (\phi) = \frac{\text{Laju dosis ekuivalen } (\dot{H})(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{jam}})}{\text{Faktor konversi } (\mu\text{Sv.cm}^2/\text{n})} \quad (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Kalibrasi Detektor Cr-39 Menggunakan

Sumber Standar $^{252}\text{Californium}$. Ketelitian hasil tanggapan dipengaruhi oleh kondisi dari detektor CR-39, sehingga harus dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan sumber standar sebelum dilakukan pengukuran. Pengkalibrasian ini digunakan untuk mengetahui respon detektor terhadap radiasi. Kalibrasi dilakukan dengan sumber neutron standar ^{252}Cf dengan laju dosis 1.564 mSv pada jarak 25 cm. Gambar 4 merupakan hasil jejak yang tampak di mikroskop untuk penyinaran kalibrasi.

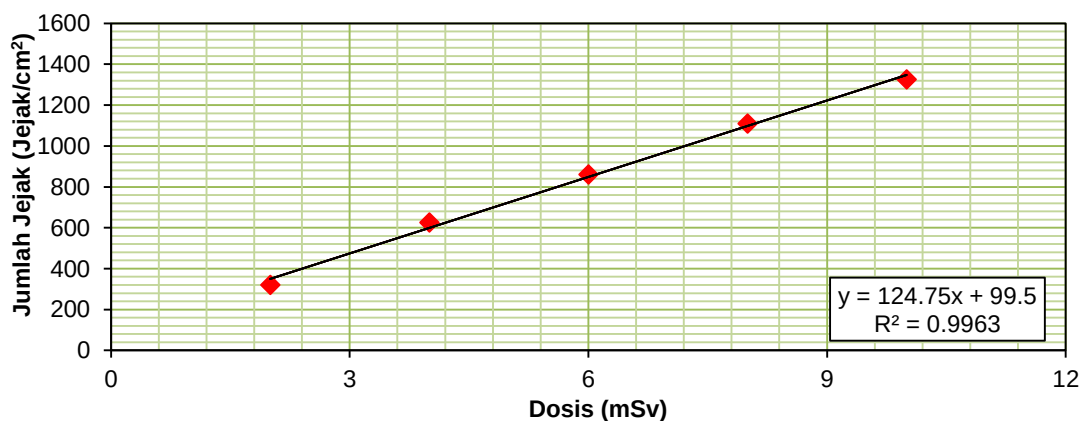


Gambar 4. Hasil bentuk jejak yang tampak di mikroskop untuk penyinaran kalibrasi detektor CR-39

Hasil jejak yang tampak di mikroskop merupakan hasil reaksi yang terjadi ketika neutron termal berinteraksi dengan atom Boron.

Proses interaksi ini menghasilkan sebuah jejak laten atau *latent track*. Terdapat 2 jenis jejak yang diperoleh jejak pertama disebabkan oleh partikel alfa yang memiliki bentuk jejak besar dan gelap, dan yang kedua memiliki bentuk jejak lebih kecil atau terang atau disebut jejak Lithium. Jumlah jejak gelap yang terbentuk mewakili jumlah neutron termal. Terlihat bahwa jejak yang dihasilkan lebih jelas, hal ini disebabkan oleh adanya filter Boron yang berfungsi untuk mengurangi energi dari neutron maupun proton recoil yang dihasilkan Boron. Karena adanya pengurangan tersebut, proton recoil tidak menembus detektor terlalu dalam (hanya di permukaan) dan setelah di etsa jejak akan lebih tampak jelas dengan ukuran jejak yang besar. Ukuran besar kecilnya jejak dipengaruhi oleh besarnya energi partikel alfa yang berinteraksi dengan detektor CR-39.

Kalibrasi detektor ini perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dosis yang diberikan pada detektor. Semakin banyak dosis yang diberikan, maka semakin banyak jumlah jejak partikel yang diperoleh. Ini menandakan bahwa detektor yang di kalibrasi di laboratorium neutron memiliki hasil yang bagus, sehingga dapat diaplikasikan ke rumah sakit. Besarnya tanggapan detektor dipengaruhi oleh jumlah jejak yang dihasilkan saat kalibrasi. Gambar 5 merupakan data hasil kalibrasi menggunakan sumber neutron Standar $^{252}\text{Californium}$.



Gambar 5. Grafik hubungan dosis dan jumlah jejak kalibrasi CR-39

Hasil pengukuran menunjukkan jumlah jejak yang diperoleh semakin banyak seiring bertambahnya dosis yang diberikan. Hal ini dikarenakan jumlah neutron yang diberikan kepada bahan semakin besar sehingga kemampuan neutron untuk menumbuk materi dan

menghasilkan *proton recoil* pun semakin meningkat.

Kurva kalibrasi menunjukkan hubungan antara dosis neutron dan jumlah jejak. Kurva menghasilkan garis linear dengan persamaan $y = 124.7x + 99.5$. Tingkat kemiringan dapat

menyatakan sensitivitas detektor sehingga besarnya sensitivitas detektor adalah sebesar 124.7 jejak/cm².mSv artinya setiap penambahan kenaikan dosis sebesar 1 mSv jejak pada detektor akan bertambah sebesar 124.7 per cm². Nilai sensitivitas diimbangi pula dengan nilai regresi kurva sebesar 0,996. Selain dihasilkan nilai sensitivitas, dari persamaan kurva pada Gambar 5 dapat pula ditentukan limit deteksi detektor. Limit deteksi ini digunakan untuk mengetahui apakah jejak yang terbentuk merupakan jejak dari sumber radioaktif atau tidak. Limit deteksi detektor dari penelitian ini sebesar 31.2 μ Sv. Limit deteksi penelitian ini masih berada di bawah nilai standar rekomendasi ICRP sebesar 80 μ Sv, sehingga, detektor ini masih dalam keadaan bagus dan dapat

digunakan sebagai acuan untuk menentukan dosis neutron pada Linac.

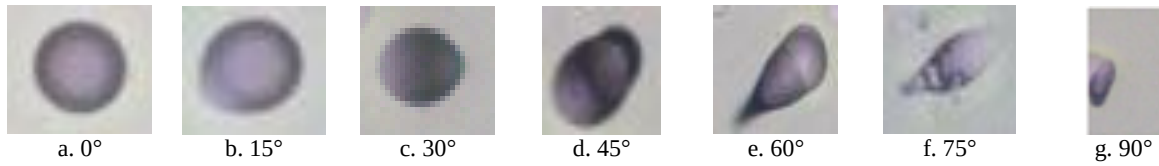
Estimasi Fluks Neutron Termal Di Dalam Fantom. Linac dioperasikan menggunakan 10 MV dan 15 MV dengan sudut *gantry* dan kolimator diposisikan pada posisi *isocenter* (0, 0, 0) tegak lurus terhadap sumber. Pengukuran ini dilakukan pada kedalaman 15 cm dari permukaan air dengan menggunakan dosis target sebesar 3 Gy. Perlakuan disesuaikan dengan hasil *Treatment Planning System* (TPS) hasil penelitian sebelumnya sesuai prosedur radioterapi. Hasil estimasi fluks neutron termal di dalam fantom pada penyinaran Linac 10 MV dan 15 MV ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pembacaan jejak, dosis, dan fluks neutron termal pada Linac 10MV dan 15MV untuk dosis target 3Gy.

Linac	Nomor detektor	Posisi detektor	Rata-rata jumlah jejak netto (jejak/cm ²)	Rata-rata dosis ekuivalen (mSv/Gy)	Rata-rata fluks neutron (n.cm ² .s)
10 MV	1	0°	1745	1.166	6.637×10 ³
	2-7	45°	1663	1.112	4.561×10 ³
	8-16	90°	1562	1.044	3.466×10 ³
	17-25	115°	1495	0.999	2.403×10 ³
	26-31	135°	1369	0.915	1.285×10 ³
15 MV	1	0°	18680	12.480	10.723×10 ⁴
	2-7	45°	17440	11.652	9.637×10 ⁴
	8-16	90°	15717	10.501	8.475×10 ⁴
	17-25	115°	13831	9.243	6.298×10 ⁴
	26-31	135°	12173	8.135	5.142×10 ⁴

Hasil Linac 10 MV dan 15 MV menunjukkan bahwa fluks neutron tertinggi pada Linac 10 MV dan 15 MV berada pada kedalaman 0° atau tegak lurus terhadap sumber, kemudian mulai menurun dan semakin berkurang seiring semakin jauh jaraknya dari sumber. Masing-masing menghasilkan fluks sebesar 6.637×10³ (n.cm².s) ± 0.12×10³ dan 10.723×10⁴ (n.cm².s) ± 0.09×10⁴. Nilai tertinggi dikarenakan posisi detektor lebih dekat dengan sumber, sehingga berpeluang menerima hamburan lebih besar. Saat penyinaran pada fantom air, terjadi interaksi antara neutron cepat dengan air (H₂O) yang mengakibatkan penurunan energi neutron cepat dari awal penyinaran, kemudian neutron mengalami termalisasi menjadi neutron termal. Neutron termal yang terbentuk dari reaksi ini kemudian akan mengurangi jumlah neutron termal yang berinteraksi dengan detektor, sehingga jejak yang terbaca lebih sedikit [9].

Neutron termal yang terbentuk dari reaksi ini akan menambah jumlah neutron termal yang berinteraksi dengan detektor, sehingga jejak yang terbaca lebih banyak. Sedangkan nilai terendah terdeteksi pada detektor paling bawah, hal ini disebabkan karena neutron termal telah habis terserap media fantom. Sedangkan nilai dosis ekuivalen pada isocenter pada 10 MV hanya sekitar 0.011% Sv/Gy, sedangkan pada 15 MV hanya sekitar 0.12% Sv/Gy. Ini menunjukkan bahwa Linac masih berada dibawah batas minimum kebocoran neutron yakni sebesar 0,2%. Meskipun kontribusi dosis neutron kecil, tetapi dapat memicu kanker sekunder mengingat faktor bobot radiasi neutron ($W_R=5$) lebih besar dari foton ($W_R=1$) [10]. Sehingga upaya proteksi radiasi harus diminimalisir dengan memasukkannya kedalam *Treatment planning System* (TPS).



Gambar 6. Bentuk jejak partikel alfa yang terlihat di mikroskop berdasarkan arah datangnya

Tabel 2. Hasil perhitungan jejak partikel alfa pada Linac 10 MV

No. Detektor	Jumlah jejak berdasarkan arah datang partikel							Total Jejak (ΣJ)	Rata-Rata Jejak (J avg)
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
1	7102	5672	4030	2009	433	8	5	19254	621.25±0.47
2-7	6769	4962	4184	2100	504	3	4	18522	597.61±0.46
8-16	5210	4779	2670	1572	321	8	2	14560	469.74±0.44
17-25	4647	3789	2216	1474	312	4	1	12442	401.38±0.43
26-31	1069	689	450	284	56	1	0	2549	82.22±0.34

Tabel 3. Hasil perhitungan jejak partikel alfa pada Linac 15 MV

No. Detektor	Jumlah jejak berdasarkan arah datang partikel							Total Jejak (ΣJ)	Rata-Rata Jejak (J avg)
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
1	14080	8229	6160	3768	603	50	15	32905	1061.45±0.90
2-7	13352	7545	5550	2955	580	13	10	30005	967.90±0.62
8-16	9981	5997	4873	2232	503	12	9	23607	761.51±0.58
17-25	8497	5569	4618	2166	306	36	4	21196	683.74±0.36
26-31	2685	934	689	290	73	2	1	4674	150.77±0.32

Penentuan arah datang partikel alfa Linac 10 MV dan 15 MV. Arah datang partikel yang dihasilkan Linac 10 MV dan 15 MV terlihat pada bentuk jejak yang diperoleh. Bentuk jejak yang dihasilkan beragam, namun tidak semua hasil berbentuk bulat, tergantung arah datang partikel, seperti pada Gambar 6. Sedangkan hasil perhitungan jejak dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 2.

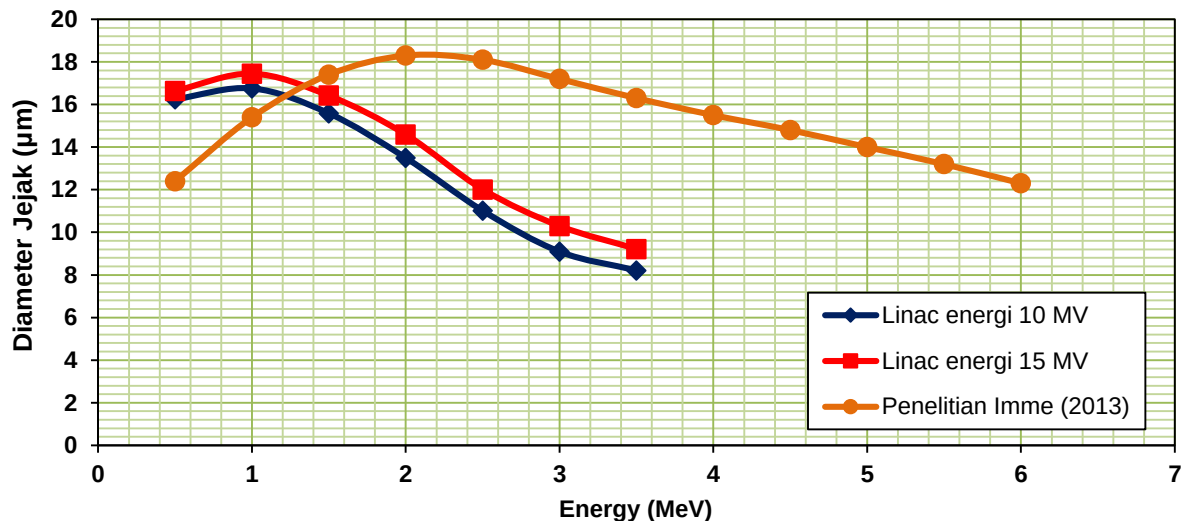
Bentuk jejak yang tertampil pada Gambar 3, menampilkan bentuk berdasarkan arah datang partikel. Bentuk jejak dengan arah datang partikel 0° (tegak lurus dengan sumber) menghasilkan jejak berbentuk bulat lebih dominan dibandingkan dengan arah datang 90° yang menghasilkan bentuk jejak berbentuk lancip. Sedangkan Tabel 2 dan 3 menunjukkan hasil perhitungan jejak partikel alfa pada Linac 10 MV dan 15 MV. Tabel 2 dan 3 menunjukkan adanya dominasi jejak maximum pada detektor 1 dengan arah datang partikel 0° dan mulai menurun seiring dengan penambahan arah datang partikel, sedangkan jejak minimum terlihat pada arah datang 90°. Dominasi ini diduga karena

posisi detektor tegak lurus dengan sumber, sehingga arah datangnya tepat 0° pada titik *isocenter*. Penurunan banyaknya jejak disebabkan karena tidak semua paparan radiasi yang terekspos ke medium tegak lurus dengan detektor, hal ini tergantung dari bidang yang dikenainya dan hamburan dari arah paparan [11]. Ketika arah datang partikel sejajar terhadap permukaan detektor, maka komponen dari V_t atau laju etsa jejak tegak lurus terhadap permukaan detektor sehingga menghasilkan jejak bulat sempurna, sedangkan jika arah datang partikel tidak tegak lurus maka terdapat sudut limit berupa $\sin \theta$. Sudut limit inilah yang menghasilkan bentuk lancip pada jejak [12].

Penentuan Energi Partikel Alfa (MeV) Berdasarkan Diameter Jejak Partikel pada Linac 10 MV dan 15 MV. Tanggapan energi partikel alfa sangat bergantung pada besarnya diameter jejak. Diameter jejak partikel dipengaruhi oleh *incidence angle* (sudut datang), dan kedalaman (*track depth*) [13]. Penentuan

energi alfa dimaksudkan untuk membedakan jejak atau trek sesuai dengan nilai energi. Pendekatan responsif dilakukan dengan menggunakan sebuah program untuk membantu mengestimasi tanggapan energi yang dihasilkan dari jejak dengan memasukkan beberapa data kontrol, agar dapat diketahui diameter yang

dihasilkan, sehingga nilai tanggapan energi dapat diestimasi. Data kontrol yang dimasukkan ke dalam program tersebut yaitu nilai V_b (bulk etch) atau laju etsa bahan = $1.6 \mu\text{m}/\text{jam}$, lama etsa = 7 jam, dan *incidence angle* (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°). Hasil nilai prediksi energi partikel alfa dalam penelitian ini di plot dalam Gambar 5.



Gambar 5. Grafik prediksi nilai energi (MeV) terhadap diameter jejak (μm) Linac 10 MV dan Linac 15 MV, dan penelitian Imme (2013).

Hasil penelitian berdasarkan Gambar 5 menunjukkan adanya kenaikan grafik dan di lanjutkan dengan penurunan grafik. Nilai tertinggi pada Linac 10 MV terletak pada energi 1.0 MeV dengan diameter sebesar $17.45 \mu\text{m}$, dan terendah pada energi 3.5 MeV dengan ukuran diameter sebesar $8.21 \mu\text{m}$. Sedangkan Linac 15 MV terletak pada energi 1.0 MeV dengan diameter sebesar $17.95 \mu\text{m}$, dan terendah pada energi 3.5 MeV dengan ukuran diameter sebesar $9.21 \mu\text{m}$. Terdapat selisih diameter yang tidak signifikan pada kedua hasil tersebut, hanya sekitar 0.1 %. Hanya saja Linac 15 MV memiliki bentuk diameter yang lebih besar dibandingkan dengan Linac 10 MV. Sedangkan hasil penelitian Imme, 2013 [14], nilai tertinggi terletak pada energi 2.0 MeV dengan diameter $18.3 \mu\text{m}$, dan terendah pada energi 6 MeV dengan diameter sebesar $12.3 \mu\text{m}$. Kedua contoh tersebut, menunjukkan ukuran diameter tidak jauh berbeda dengan penelitian terdahulu. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin kecil energi partikel (MeV), maka semakin besar pula diameter jejak yang diperoleh. Hal ini disebabkan karena pembentukan diameter partikel tergantung oleh energi yang di paparkan,

diasumsikan formasi jejak terbentuk akibat energi total rata-rata yang hilang sebesar dE/dx ketika menumbuk permukaan detektor CR-39. Energi yang hilang diakibatkan karena proses ionisasi dan eksitasi elektron dari atom CR-39. Akibat proses eksitasi inilah elektron terpenyal sehingga ada kekosongan di area tertentu, sehingga semakin besar energi maka penetrasi akan semakin dalam, sehingga dibutuhkan jarak yang panjang. Karena semakin dalamnya jarak maka energi menjadi berkurang sehingga menghasilkan jejak yang semakin kecil [15].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa semakin jauh dari sumber semakin berkurang nilai fluks neutron termal terlihat dari fluks neutron termal Linac 10 MV tertinggi berada pada kedalaman 0° sebesar $1.637 \times 10^3 \text{ (n.cm}^2\text{.s)}$ dan berkurang mencapai 135° sebesar $1.285 \times 10^3 \text{ (n.cm}^2\text{.s)}$ begitu pula Linac 15 MV, hal ini disebabkan akibat proses tumbukan dengan materi menyebabkan fluks semakin berkurang.

Hasil reaksi menghasilkan bentuk jejak dan tanggapan energi. Bentuk jejak dipengaruhi oleh arah datang partikel. Semakin tegak lurus (tepat 0° pada titik *isocenter*) semakin besar jejak yang diperoleh. Sedangkan tanggapan energi bergantung pada besarnya diameter jejak. Diameter jejak minimum menghasilkan energi maksimum, begitu pula sebaliknya. Hal ini disebabkan karena pengaruh penetrasi dari energi, Semakin dalam penetrasi, nilai energi semakin berkurang sehingga menghasilkan jejak yang kecil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterimakasih pada seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian ini, khususnya PTKMR BATAN, RS. Siloam Simatupang dan RS. Siloam Semanggi atas ijin menggunakan fasilitasnya selama melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Diyona, F., Milvita, D., Herlinda, S., Yudi, K., dan Sandy, P. (2016) Analisis Pengaruh Sudut Penyinaran terhadap Dosis Permukaan Fantom Berkas Radiasi Gamma Co-60 pada Pesawat Radioterapi. *Jurnal Fisika Unand*. 5 (2), 131–135.
- [2] Vukovic, B., Faj, D., Poje, M., Varga, M., Radolic, V., Miklavcic, I., et al. (2010) A neutron track etch detector for electron linear accelerators in radiotherapy. *Radiology and oncology*. 44 (1), 62–6.
- [3] Firmansyah, M.A. (2014) Pengukuran neutron Cepat di ruang Linac Medis Menggunakan Detektor Jejak Nuklir CR-39, Universitas Brawijaya, 2014.
- [4] Latifah, R., Noor, J.A.E., dan Bunawas, B. (2013) Thermal Neutron Flux Measurements at Room Treatment LINAC iX 15 MV. *Natural B*. 2 (2), 184–190.
- [5] Eaton, B.R., MacDonald, S.M., Yock, T.I., dan Tarbell, N.J. (2015) Secondary Malignancy Risk Following Proton Radiation Therapy. *Frontiers in oncology*. 5 (November), 261.
- [6] Septiani, D.F. (2015) Perkiraan Dosis ekuivalen Neutron Cepat pada Pasien Radioterapi Linac 15 MV, Universitas Brawijaya, 2015.
- [7] Hentihu, F.K. (2014) Perkiraan Dosis Ekuivalen Neutron Termal Pasien Radioterapi Linac 15 MV, Universitas Brawijaya, 2014.
- [8] Forbes, G.B. (1987) Human Body Composition. Springer New York, New York, NY.
- [9] Sánchez-Doblado, F., Domingo, C., Gómez, F., Sánchez-Nieto, B., Muñiz, J.L., García-Fusté, M.J., et al. (2012) Estimation of neutron-equivalent dose in organs of patients undergoing radiotherapy by the use of a novel online digital detector. *Physics in medicine and biology*. 57 (19), 6167–91.
- [10] Akhadi, M. (2000) Dasar-Dasar Proteksi Radiasi. PT. Rineka Cipta, Jakarta.
- [11] Sutarman, Nirwani, L., Emlinarti, dan Warsona, A. (2005) Penentuan Konsentrasi Gas Radon dan Thoron Menggunakan Detektor Film Lr-115 di DKI dan Sekitarnya. in: Pros. PPI – PDIPTN 12 Juli 2005, Puslitbang Teknologi Maju - BATAN, Yogyakarta.
- [12] Hasan, H.I., Hussein, A.K., dan Kheder, R.B. (2013) Angular Response of Nuclear Track Detector CR-39 for Alpha Particles with Different Energies. *Pure Applied Science*. 1 (1), 22–27.
- [13] Law, Y.L., Nikezic, D., dan Yu, K.N. (2008) Optical appearance of alpha-particle tracks in CR-39 SSNTDs. *Radiation Measurements*. 43 128–131.
- [14] Immè, G., Morelli, D., Aranzulla, M., Catalano, R., dan Mangano, G. (2013) Nuclear track detector characterization for alpha-particle spectroscopy. *Radiation Measurements*. 50 (50), 253–257.
- [15] Nikezic, D. dan Yu, K.N. (2008) Analyses of light scattered from etched alpha-particle tracks in PADC. *Radiation Measurements*. 43 (8), 1417–1422.