

ANALISIS KELUARAN BERKAS FOTON FREE FLATTENING FILTER LINAC VARIAN HALCYON DENGAN VARIASI LUAS LAPANGAN RADIASI

Aprilia Jatiningtiyas Ragil Putri¹, Pratiwi Sri Wardani² dan Sahara Hamas Intifadhah³

1,2. Fisika Medik, Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Jl. Kuaru Gn. Kelua, Samarinda, 75119, Indonesia

3. Fisika Teori dan Material, Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Jl. Kuaru Gn. Kelua, Samarinda, 75119, Indonesia

E-mail: putee2404@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan hasil deviasi pengukuran keluaran berkas foton 6 MV Free Flattening Filter berdasarkan standar toleransi yang diperbolehkan pada protokol IAEA TRS No. 483 dan TRS No. 398 serta mengetahui pengaruh variasi luas lapangan radiasi terhadap keluaran berkas radiasi. Penelitian ini dilakukan menggunakan bantuan software MyQA Accept yang merupakan perangkat lunak QA tahunan. Penelitian ini menggunakan teknik Source Surface Distance (SSD) dengan metode Percentage Depth Dose (PDD) dan variasi luas lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $12 \times 12 \text{ cm}^2$, $15 \times 15 \text{ cm}^2$, $20 \times 20 \text{ cm}^2$, $25 \times 25 \text{ cm}^2$, dianalisis untuk dapat menentukan kualitas dosis radiasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa keluaran berkas per 2 MU lapangan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ sebesar 1,999 Gy dengan deviasi 0,026%, lapangan $12 \times 12 \text{ cm}^2$ sebesar 2,025 Gy dengan deviasi 1,268%, lapangan $15 \times 15 \text{ cm}^2$ sebesar 2,037 Gy dengan deviasi 1,833% dan lapangan $20 \times 20 \text{ cm}^2$ sebesar 2,058 Gy dengan deviasi 2,900%, nilai ini masih berada dalam rentang standar toleransi IAEA karena $< 3\%$. Namun, keluaran berkas lapangan $25 \times 25 \text{ cm}^2$ sebesar 2,084 Gy dengan deviasi 4,209%, dianggap tidak lolos dan melewati batas toleransi IAEA sehingga dapat menyebabkan efek radiasi untuk organ sehat di sekitar target.

Kata kunci: Dosis Radiasi; Free Flattening Filter (FFF); Percentage Depth Dose (PDD)

Abstract

This study examines the deviation in the output of a 6 MV Free Flattening Filter (FFF) photon beam from a Varian Halcyon Linac, following IAEA TRS No. 483 and TRS No. 398 protocols, and explores the effect of varying radiation field sizes on photon beam output. The research utilized MyQA Accept software and employed the Source Surface Distance (SSD) technique with the Percentage Depth Dose (PDD) method. Field sizes of $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $12 \times 12 \text{ cm}^2$, $15 \times 15 \text{ cm}^2$, $20 \times 20 \text{ cm}^2$, and $25 \times 25 \text{ cm}^2$ were analyzed to determine radiation dose quality. Results show that the photon beam output for the $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field was 1.999 Gy with a deviation of 0.026%, for the $12 \times 12 \text{ cm}^2$ field 2.025 Gy with a 1.268% deviation, for the $15 \times 15 \text{ cm}^2$ field 2.037 Gy with a 1.833% deviation, and for the $20 \times 20 \text{ cm}^2$ field 2.058 Gy with a 2.900% deviation—all within IAEA's acceptable tolerance of $< 3\%$. However, the $25 \times 25 \text{ cm}^2$ field showed an output of 2.084 Gy with a 4.209% deviation, exceeding IAEA limits, potentially leading to harmful effects on surrounding healthy tissues.

Keywords: Radiation Dose; Free Flattening Filter (FFF); Percentage Depth Dose (PDD)

PENDAHULUAN

Berdasarkan data Riset Kesehatan Dasar 2013, prevalensi kanker di Indonesia mencapai 1,4%, atau sekitar 347.792 orang [1]. Terapi kanker dapat dilakukan melalui pembedahan, kemoterapi, imunoterapi, terapi hormon, atau radioterapi. Radioterapi, khususnya radioterapi eksterna, adalah terapi non-bedah yang menggunakan radiasi foton dan elektron yang dihasilkan oleh linear accelerator (LINAC) [2]. LINAC *Free Flattening Filter* (FFF) merupakan teknologi yang lebih unggul dibandingkan LINAC dengan *Flattening Filter* (WFF) karena memiliki laju dosis yang lebih tinggi, memungkinkan waktu penyinaran yang lebih singkat dan perlindungan lebih baik bagi jaringan sehat [3].

Namun, hingga pertengahan 2019, hanya empat rumah sakit di Indonesia yang memiliki LINAC FFF. Teknologi ini relatif baru di Indonesia, sehingga penelitian mengenai perangkat ini masih terbatas. Beberapa studi sebelumnya telah meneliti karakteristik dan keluaran berkas foton FFF [3]. Misalnya, Putri (2021) menemukan bahwa dosis maksimum untuk berkas FFF terjadi pada kedalaman 3,9 cm [4], sementara Milvita dkk, (2018) menunjukkan bahwa semakin dalam target radiasi, semakin tinggi dosis yang diterima hingga mencapai kedalaman maksimum (z_{max}) [5]. Laksono dkk, (2015) membandingkan metode *Percentage Depth Dose* (PDD) dan *Tissue Phantom Ratio* (TPR) dalam menentukan indeks kualitas berkas energi 6 MV dan 10 MV, menemukan adanya penumpukan dosis saat berkas foton mencapai dosis relatif maksimum [6].

Mengingat keterbatasan jumlah LINAC FFF di Indonesia dan minimnya penelitian, penting untuk melakukan studi lebih lanjut mengenai deviasi pengukuran keluaran berkas foton FFF dibandingkan standar toleransi yang ditetapkan oleh protokol *International Atomic Energy Agency* (IAEA) *Technical Report Series* (TRS) No. 483 dan TRS No. 398. Penelitian ini juga perlu meninjau pengaruh variasi luas lapangan radiasi terhadap keluaran berkas foton. Data yang dihasilkan dari penelitian ini akan sangat berguna dalam perhitungan manual terapi radiasi, khususnya untuk pasien yang membutuhkan penyinaran segera.

METODE

Penelitian ini dirancang untuk menganalisis hasil keluaran berkas foton 6 MV *free flattening filter* berdasarkan standar toleransi pada protokol *Technical Report Series* No. 483. Data diperoleh dari Instalasi Onkologi Radiasi dan Kedokteran Nuklir RSUD Dr. Kanujoso Djatiwibowo, Balikpapan, Kalimantan Timur. Pengukuran *percentage depth dose* dan *ouput* keluaran berkas foton 6 MV *free flattening filter* dilakukan menggunakan elektrometer, detektor relatif CC13/17861, detektor relatif CC13/17862, dan IBA FC-65P (*Wellhofer* IC-69) *Farmer*. Objek yang digunakan sebagai target penyinaran adalah *blue water phantom* yang berisi aquades sebagai pengganti tubuh manusia. Penyinaran dalam pengukuran *percentage depth dose* dan *output* berkas foton menggunakan energi 6 MV dengan SSD 100 cm dan luas lapangan 10×10 cm², 12×12 cm², 15×15 cm², 20×20 cm², dan 25×25 cm².

Data-data tersebut diukur dengan kondisi SSD konstan 100 cm. Data yang berupa hasil dari pengukuran dosis pada kedalaman 20 cm (D_{20}) dan pengukuran dosis pada kedalaman 10 cm (D_{10}) akan diolah berdasarkan Persamaan berikut:

$$PDD = \frac{D_d}{D_{max}} \quad (1)$$

[4].

Data dari perhitungan PDD dilakukan untuk mengetahui nilai *Tissue Phantom Ratio* (TPR). TPR merupakan nilai kualitas berkas yang digunakan untuk menentukan nilai K_{Q,Q_0} . Nilai TPR dihitung menggunakan Persamaan 2:

$$TPR_{20,10} = 1.2661 \times PDD_{20,10} - 0.0595 \quad (2)$$

[7].

Setelah data pengukuran diperoleh, selanjutnya data tersebut akan diolah berdasarkan Persamaan 3 untuk mengetahui faktor koreksi tekanan dan temperatur (K_{TP}). Faktor koreksi temperatur dan tekanan diambil dari nilai temperatur pada saat penyinaran (T) dengan nilai temperatur referensi (T_0) dengan satuan °C yang umumnya suhu referensi memiliki nilai sebesar 20°C, serta nilai tekanan saat penyinaran (P) dengan nilai tekanan referensi (P_0) dengan satuan kPa yang umumnya tekanan referensi bernilai 101.325 kPa .

$$K_{TP} = \frac{273,2+T}{273,2+T_0} \times \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

[8].

Kemudian data untuk faktor koreksi elektrometer biasanya bernilai 1. Hal ini disebabkan oleh kalibrasi *chamber* yang dilakukan secara bersamaan dengan elektrometer.

Setelah itu, data yang berupa nilai muatan pada polaritas positif (M_+), nilai muatan polaritas negatif (M_-) dan muatan pada polaritas yang sering digunakan (M) akan diolah menggunakan Persamaan 4 untuk mengetahui faktor koreksi efek polaritas (K_{pol}).

$$K_{pol} = \frac{M_+ + M_-}{2 \times M_+} \quad (4)$$

[8].

Selanjutnya, data yang berupa nilai hasil bacaan muatan yang sering digunakan (M_1) dan nilai muatan pada polaritas referensi (M_2) akan diolah menggunakan persamaan 5 untuk mengetahui faktor koreksi rekombinasi ion (K_s). Nilai koefisien kuadratik (a_0 , a_1 , dan a_2) diperoleh dari Tabel 21 dengan sumber referensi dari buku IAEA TRS 483.

$$K_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \quad (5)$$

[8].

Lalu, data yang terdiri dari nilai hasil bacaan muatan yang sering digunakan (M), nilai hasil perhitungan faktor koreksi tekanan dan temperatur (K_{TP}), nilai dari faktor koreksi elektrometer (K_{elec}) dan nilai dari hasil perhitungan faktor koreksi rekombinasi ion (K_s) akan diolah menggunakan Persamaan 6 untuk mengetahui nilai faktor bacaan bilik ionisasi (M_Q).

$$M_Q = M_1 \times K_{elec} \times K_{TP} \times K_{pol} \times K_s \quad (6)$$

[8].

Data yang berupa nilai faktor koreksi respon detektor ionisasi (M_Q), koefisien kalibrasi dosis serap air pada kualitas referensi Q_0 (N_{D,W,Q_0}) dan faktor koreksi perbedaan respon detektor ionisasi terhadap kualitas berkas (K_{Q,Q_0}) diolah menggunakan Persamaan 7 untuk memperoleh nilai keluaran berkas radiasi Linac pada kedalaman referensi ($D_{W,Q(Z_{ref})}$).

$$D_{W,Q(Z_{ref})} = M_Q \times N_{D,W,Q_0} \times K_{Q,Q_0} \quad (7)$$

[9].

Selain itu, data yang mencakup nilai keluaran berkas radiasi Linac pada kedalaman referensi ($D_{W,Q(Z_{ref})}$) dan PDD(Z_{ref}) akan di hitung menggunakan persamaan 8 guna mendapatkan nilai keluaran berkas radiasi

Linac pada kedalaman maksimum ($D_{W,Q(Z_{max})}$).

$$D_{W,Q(Z_{max})} = \frac{100 \times D_{W,Q(Z_{ref})}}{PDD(Z_{ref})} \quad (8)$$

[9].

Kemudian, dilakukan perhitungan deviasi untuk memperoleh nilai kualitas berkas radiasi pada luas lapangan tertentu dengan menggunakan Persamaan 9:

$$\text{Deviasi} = \frac{D_{W,Q(Z_{max})} - MU}{MU} \times 100\% \quad (9)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran jumlah muatan berkas foton dilakukan untuk mengetahui kestabilan muatan yang dikeluarkan oleh alat Linac dengan tegangan tertentu. Kemudian didapatkan hasil pengukuran jumlah muatan berkas foton pada tiap-tiap lapangan radiasi adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Pengukuran Jumlah Muatan Berbagai Luas Lapangan

Tegangan	Muatan (nC)				
	10×10 cm ²	12×12 cm ²	15×15 cm ²	20×20 cm ²	25×25 cm ²
+300 V (M ₁)	26,10	26,75	27,46	28,32	28,78
-300 V	26,07	26,73	27,42	28,29	28,84
+100 V (M ₂)	25,64	26,27	26,96	27,97	27,27

Tabel 1 merupakan hasil pengukuran jumlah muatan berkas foton pada lapangan 10×10 cm² dengan menggunakan tegangan +300 V (M_1), -100 V, dan -300 V (M_2). Pada tiap tegangan dilakukan pengukuran sebanyak 3 kali untuk mendapatkan muatan yang stabil. Standar toleransi untuk muatan listrik yang dikeluarkan Linac adalah ±0,1%.

Tabel 2. PDD Kedalaman Referensi dan Kedalaman Tertentu

Field Size	D10 _{cm} (%)	D20 _{cm} (%)
10×10 cm ²	63,60%	34,73%
12×12 cm ²	64,31%	35,75%
15×15 cm ²	65,57%	36,95%
20×20 cm ²	66,39%	38,33%
25×25 cm ²	67,13%	39,27%

Dari hasil pengukuran PDD pada kedalaman referensi dan kedalaman tertentu pada Tabel 2, terlihat bahwa perolehan nilai keluaran dosis pada kedalaman 10 cm dan

kedalaman 20 cm dipengaruhi oleh ukuran lapangan radiasi yang digunakan. Pada pengukuran keluaran dosis tersebut digunakan sumber tegangan sebesar 6 MV dengan mode FFF. Penambahan ukuran lapangan radiasi non-standar menghasilkan peningkatan dosis pada kedalaman tertentu sehingga radiasi lebih tersebar yang mungkin dapat berguna untuk perawatan tumor yang lebih besar. Sehingga semakin besar ukuran lapangan yang digunakan maka semakin tinggi pula dosis yang akan diterima oleh tubuh pasien.

Tabel 3. Nilai Parameter Kualitas Berkas Foton

Field Size	PDD (20,10)	TPR (20,10)	K _{Q,Q₀}	MU
10×10 cm ²	0,5460	0,632	0,9970	200
12×12 cm ²	0,5560	0,644	0,9960	200
15×15 cm ²	0,5640	0,654	0,9950	200
20×20 cm ²	0,5770	0,671	0,9930	200
25×25 cm ²	0,5850	0,681	0,9930	200

Berdasarkan Tabel 3 diperoleh hasil perhitungan perbandingan dosis pada kedalaman 10 cm dan 20 cm serta perhitungan TPR_(20,10) untuk tiap-tiap lapangan radiasi dengan menggunakan MU sebesar 200. Nilai K_{Q,Q₀} diperoleh dari Tabel 13 TRS 398 dengan menggunakan nilai dari hasil perhitungan TPR_(20,10).

Tabel 4. Parameter Nilai Faktor Koreksi Berbagai Luas Lapangan

Parameter	Lapangan (cm ²)				
	10×10	12×12	15×15	20×20	25×25
T ₀ (°C)	20	20	20	20	20
T (°C)	20	20	20	19	20
P ₀ (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
P (kPa)	100,4	100,4	100,4	100,4	100,4
SSD (cm)	100	100	100	100	100
Z _{ref} (cm)	10	10	10	10	10

Tabel 4 merupakan pengelompokkan parameter untuk faktor koreksi temperatur dan tekanan pada kelima lapangan yang bertujuan untuk mempermudah pengerjaan perhitungan K_{TP}. Dalam tabel tersebut lapangan 10 × 10 cm², 12 × 12 cm², 15 × 15 cm² dan 25 × 25 cm² terukur data temperatur pada saat dilakukan penyinaran sebesar 20°C, sedangkan pada lapangan 20 × 20 cm² terjadi penurunan suhu sebanyak 1% yang mengakibatkan suhu

yang terukur pada lapangan tersebut bernilai 19%. Hal tersebut terjadi karena proses pengukuran data ukuran lapangan 20 × 20 cm² dilakukan pertama kali sehingga menyebabkan suhu ruangan di sekitar alat lebih dingin. Selain itu terdapat nilai tekanan pada saat penyinaran untuk kelima lapangan adalah 100,4 kPa, dengan temperatur referensi sebesar 20°C, tekanan saat pengukuran berlangsung yaitu sebesar 101,3 kPa, kemudian nilai SSD sebesar 100 cm, nilai Z_{ref} sebesar 10 cm, dan nilai N_{D,W,Q₀} untuk jenis *ion chamber* FC65-P/IC69 sebesar 0,04804 Gy/nC. Semua nilai faktor koreksi keluaran berkas foton pada energi 6 MV umumnya bernilai ±1%. Hal ini berarti bahwa nilai faktor koreksi yang telah diperoleh dari penelitian ini telah sesuai dengan standar yang ditetapkan pada TRS 398 IAEA.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Keluaran Berkas Berbagai Luas Lapangan

Parameter	Lapangan (cm ²)				
	10×10	12×12	15×15	20×20	25×25
K _{TP}	1,009	1,009	1,009	1,005	1,009
K _{pot}	0,994	0,996	0,994	0,999	1,001
K _{elec}	1	1	1	1	1
K _s	1,008	1,009	1,009	1,006	1,008
M _I (nC)	26,103	26,750	27,460	28,327	28,783
M _Q (nC)	26,551	27,222	27,938	28,648	29,329
D _{W,Q(Zref)} (Gy)	1,272	1,303	1,335	1,367	1,399
(cGy)	127,167	130,251	133,544	136,663	139,911
D _{W,Q(Zmax)} (Gy)	1,999	2,025	2,037	2,058	2,084
(cGy)	199,948	202,536	203,667	205,849	208,418

Pada Tabel 5 nilai koreksi tekanan dan temperatur (K_{TP}) menunjukkan konsistensi pada hampir semua ukuran lapangan, kecuali untuk lapangan ukuran 20×20 cm² yang sedikit lebih rendah yaitu 1,0055. Hal tersebut disebabkan karena nilai suhu lapangan 20×20 cm² pada saat pengukuran lebih rendah dari lapangan lainnya. Nilai koreksi efek polaritas (K_{pot}) berkisar antara 0,994 - 1,0010, yang mana terjadi sedikit peningkatan seiring bertambahnya ukuran lapangan. Kemudian, nilai koreksi elektrometer tetap konstan pada semua ukuran lapangan, jika ruangan ionisasi dan elektrometer dikalibrasi secara bersamaan sebagai satu tahapan pengukuran maka tidak ada faktor kalibrasi elektrometer terpisah yang harus diterapkan [7]. Koreksi rekombinasi ion (K_s) juga menunjukkan variasi kecil dari hasil perhitungan yang berkisar antara 1,0061 hingga 1,0090. Selain itu hasil perhitungan untuk dosis serap pada kedalaman referensi dan dosis serap

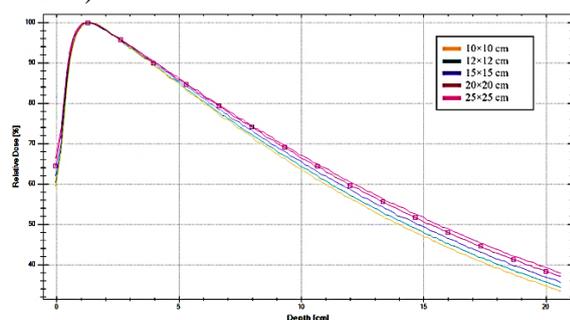
pada kedalaman maksimum terlihat meningkat seiring bertambahnya ukuran luas lapangan radiasi.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Deviasi Berbagai Luas Lapangan

Luas Lapangan Radiasi	Deviasi (%)	Hasil
10×10 cm ²	0,026	Lolos
12×12 cm ²	1,268	Lolos
15×15 cm ²	1,833	Lolos
20×20 cm ²	2,900	Lolos
25×25 cm ²	4,296	Adjust

Pada Tabel 6 menampilkan hasil perhitungan dari deviasi untuk berbagai luas lapangan. Nilai deviasi juga menunjukkan adanya peningkatan seiring bertambahnya ukuran luas lapangan radiasi. Secara keseluruhan kualitas berkas dari semua ukuran lapangan kecuali ukuran 25×25 cm², telah memenuhi standar yang ditetapkan oleh IAEA dan dapat dinyatakan lolos. Namun, keluaran berkas yang dihasilkan dari perhitungan deviasi lapangan dengan ukuran 25×25 cm² melampaui batas standar toleransi IAEA sehingga memerlukan penyesuaian lebih lanjut (*adjust*).

Dosis radiasi yang dapat diterima oleh pasien hanya berkisar ±3% sehingga dapat dikatakan bahwa luas lapangan radiasi sebesar 25×25 cm² tidak efektif dan tidak direkomendasikan untuk digunakan kepada pasien karena dapat menyebabkan efek deterministik maupun efek stokastik [7]. Sehingga semakin besar nilai deviasi yang dihasilkan maka semakin besar pula dosis radiasi yang akan terserap oleh tubuh dan dapat membahayakan organ sehat disekitarnya (*organ at risk*).



Gambar 1. Kurva PDD Berkas Foton FFF

Berdasarkan Gambar 1, terdapat kurva PDD terhadap kedalaman berkas foton 6 MV dengan menggunakan mode *Free Flattening*

Filter (FFF) yang menunjukkan bahwa kelima variasi lapangan tersebut memiliki pola kurva yang sama. Dimana dosis relatif yang awalnya rendah kemudian meningkat hingga mencapai dosis relatif sebesar 100% pada kedalaman 1,1 cm. Jarak antara permukaan hingga sampai pada titik maksimum disebut sebagai *build-up* [10]. Setelah mencapai puncak dosis maksimum, keadaan berkas radiasi foton akan mengalami penurunan daya serap drastis dari kedalaman 2 cm hingga 20 cm. Penurunan dosis terjadi secara bertahap untuk berkas foton. Kemiringan penurunan berkurang seiring dengan peningkatan energi foton. Daerah penurunan disebut sebagai daerah *fall-off*. Daerah *build-up* terjadi karena sebagian besar energi yang ditransfer dari berkas foton awalnya diserap oleh elektron yang menempuh jarak tertentu. Energi ini akhirnya disimpan sebagai dosis pada kedalaman yang lebih dalam di dalam fantom.

Pada saat kedalaman 0 cm hingga 1,1 cm dapat dilihat bahwa dosis relatif terus menunjukkan kenaikan, hal ini terjadi karena adanya energi radiasi berinteraksi dengan medium. Ketika terjadi interaksi maka ada pelepasan energi sepanjang lintasan yang dapat disebut kerma. Energi yang dibebaskan tersebut akan diserap oleh material air. Jika kedalaman semakin tinggi maka interaksi yang terjadi antara foton di sepanjang lintasannya semakin besar hingga dosis serap akan mengalami kenaikan sampai dosis maksimum [4].

Hasil keluaran berkas foton yang diperoleh pada energi 6 MV menunjukkan bahwa hasil penelitian ini mengalami peningkatan dosis maksimum lebih cepat dari pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Putri (2021) [4]. Pada penelitian ini diperoleh puncak dosis maksimum pada kedalaman 1,1 cm sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Putri (2021) puncak dosis maksimum dicapai pada kedalaman 3,9 cm. Begitu pula dengan penurunan daya serap, yang mana pada penelitian ini terjadi penurunan daya serap dosis pada kedalaman 3,5 cm hingga 20 cm. Sedangkan penurunan daya serap dosis pada hasil penelitian Putri (2021) terjadi sedikit lebih lambat yaitu pada kedalaman 3,9 cm hingga 40 cm. Sehingga dapat diketahui ketika penyerapan dosis maksimum dicapai pada kedalaman referensi maka dosis yang mencapai di kedalaman maksimum akan lebih kecil dan

dapat mengurangi resiko terjadinya efek deterministik dan efek stokastik .

Efek deterministik merupakan efek yang terjadi apabila tubuh menerima dosis radiasi melebihi ambang batas [11]. Berdasarkan *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) efek ini bahkan dapat terjadi saat tubuh menerima dosis sekitar 0,5 cGy. Ketika tubuh terkena dosis radiasi melebihi ambang batas maka dapat terjadi beberapa efek radiasi seperti kemerahan pada kulit, kerontokan rambut, katarak, dan lain sebagainya [12]. Efek deterministik memiliki ambang batas sehingga ketika radiasi yang terserap oleh tubuh belum melewati batas maka tidak akan menimbulkan efek pada tubuh.

Efek stokastik adalah efek yang tidak mengenal ambang batas atau tanpa ambang batas. Maka serendah apapun dosis yang diterima oleh tubuh akan mengakibatkan terjadinya perubahan pada sistem biologis [11]. Nilai ambang batas merupakan dosis radiasi yang diterima oleh seseorang saat menjalankan suatu kegiatan yang tidak boleh melebihi batas dosis yang ditetapkan. Berdasarkan *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) nilai batas dosis adalah dosis yang diterima dalam jangka waktu tertentu atau dosis yang berasal dari penyinaran intensif. Contoh dari efek stokastik adalah leukimia dan beberapa neoplasma. Efek kerusakan ini dapat terjadi bila tubuh terpapar radiasi oleh dosis radiasi sebesar apapun [13].

Pemberian dosis yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan jaringan normal diluar lapangan penyinaran, sedangkan dosis yang tidak cukup untuk membunuh sel ganas akan menyebabkan kambuh atau residif [10]. Oleh karena itu, penentuan dosis yang optimal sangat penting untuk memastikan keberhasilan dan efisiensi penyinaran. Penentuan dosis juga memerlukan pertimbangan dari lokasi target, yang mana ketika terdapat tumor yang dekat dengan organ vital atau struktur sensitif umumnya memerlukan pendekatan yang lebih hati-hati. Dosis optimum yang digunakan untuk keperluan terapi haruslah berhasil secara medis dalam arti dapat menyembuhkan penyakit dan menekan seminimal mungkin efek biologis pada jaringan normal disekitarnya.

Hasil perhitungan nilai deviasi dari berbagai luas lapangan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Luas Lapangan Terhadap Nilai Deviasi

Dari Gambar 2 menunjukkan hasil deviasi yang semakin meningkat seiring bertambahnya luas lapangan radiasi yang digunakan. Kurva persentase kedalaman dosis radiasi (PDD) jelas dipengaruhi oleh luas lapangan. Namun, terdapat beberapa faktor lain yang mempengaruhi bentuk kurva PDD yaitu energi, SSD dan komposisi medium yang diradiasi. Kualitas sinar-X *megavoltage* [10]. Atenuasi foton adalah suatu proses dimana intensitas radiasi akan berkurang secara perlahan seiring bertambahnya kedalaman [14]. Selain itu, atenuasi foton adalah proses saat foton berinteraksi dengan materi dan menyimpan sebagian atau seluruh energinya. Atenuasi dipengaruhi oleh materi yang dilalui berkas dan energi berkas. Intensitas radiasi yang berkurang merupakan akibat jarak dari sumber radiasi pada target penyinaran. Intensitas titik sumber foton akan menurun sebagai fungsi kebalikan kuadrat jarak dari sumber ($\frac{1}{r^2}$). Hukum kuadrat terbalik terjadi karena foton dari sumber anisotropik menyebar secara sferis ke luar. Saat hal itu terjadi, kerapatan foton berkurang seiring dengan bertambahnya luas permukaan bola. PDD meningkat sedikit seiring dengan peningkatan SSD. Hal ini dikarenakan rasio kuadrat terbalik dari kedalaman tertentu dan kedalaman maksimum mendekati kesatuan seiring bertambahnya jarak [15].

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan pesawat terapi Linac Varian Halcyon 6 MV FFF dapat disimpulkan bahwa semakin besar luas lapangan yang digunakan akan semakin berbahaya pula efek yang dapat terjadi pada organ sehat di dalam tubuh pasien.

Penelitian selanjutnya diharapkan untuk menambahkan variasi energi agar dapat

mengetahui pengaruh *free flattening filter* (FFF) terhadap keluaran berkas. Selain itu, pengukuran PDD juga dapat menggunakan detektor yang berbeda.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Unit Onkologi Radiasi dan Kedokteran Nuklir RSUD Dr. Kanujoso Djatiwibowo Balikpapan yang telah memberikan kesempatan untuk penulis dapat melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kemenkes RI. 2018. Riset Kesehatan Dasar. Kemenkes RI. .
2. Fitriatuzzakiyyah N, Sinuraya RK, Puspitasari IM. 2017. Cancer Therapy with Radiation: The Basic Concept of Radiotherapy and Its Development in Indonesia. *Indones. J. Clin. Pharm.* **6**(4): 311.
3. Firmansyah A, Suryanati S, Rajagukguk N, Fimansyah O, Yosi S. 2019. Kalibrasi Luran Berkas Foton 6 Dan 10 MV Tanpa Flattening Filter Pesawat Pemercepat Linier Medik Elekta Versa HD Dengan Menggunakan TRS No. 483. *Pros. Semin. Keselam. Nukl.* **1**(1): 395.
4. Putri DM. Analisis Pengaruh Flattening Filter Free Terhadap Distribusi Dosis Menggunakan Metode Monte Carlo. Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati.
5. Milvita D, Mahyudin A, Alvionita V. 2018. Analisis Nilai Percentage Depth Dose(Pdd) Terhadap Variasi Kedalaman Target Dan Luas Lapangan Penyinaran Menggunakan Pesawat Linac-Cx. *Komun. Fis. Indones.* **15**(2): 93.
6. Laksono MB, Wardaya S, Budi WS, Hidayanto E. 2015. Studi Komparasi Metode Percentage Depth Dose (PDD) dan Tissue Phantom Ratio (TPR) Untuk Menentukan Indek Kualitas Berkas Energi 6 MV dan 10 MV Pada Pesawat

Linac. *Berk. Fis.* **18**(1): 1.

7. AIEA A. Dosimetry Of Small Static Fields Used In External Beam Radiotherapy.2017.
8. Abrar LA, Milvita D, Prasetyo H, Diyona F. 2023. Verifikasi Dosis Radiasi Berkas Foton 6 MV PesawatTerapi LINAC CLINAX CX Menggunakan Detektor Bilik Ionisasi di RSP Universitas Andalas. *J. Fis. Unand (JFU).* **12**(1): 83.
9. Mona V. Analisis Keluaran Berkas Radiasi Pesawat Terapi Linac Tipe Varian CX 6264 Di Rs Unand. Universitas Andalas.
10. Fuadi H, Sutanto H. 2015. Perbandingan Pegukuran PDD Dan Beam Profile Antara Detektor Ionisasi Chamber Dan Gafchromic Film Pada Lapangan 10 X 10 CM2. *Youngster Phys. J.* **4**(1): 15.
11. Hiswara E. Proteksi dan Keselamatan Radiasi di Rumah Sakit. BRIN, Jakarta. 2023.
12. Clement C, Hamada N, Mattson S. 2015. International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals : a compendium of current information related to frequently used substances. .
13. Nugraheni F, Anisah F, Susetyo GA. 2022. Analisis Efek Radiasi Sinar-X pada Tubuh Manusia. *Pros. SNFA (Seminar Nas. Fis. dan Apl.* **1**(1): 19.
14. Wulandari I, Shafii MA, Adrial R, Diyona F. 2022. Distribusi Dosis Radiasi Foton Berdasarkan Variasi Kedalaman dan Luas Lapangan Penyinaran Pada Fantom Menggunakan Peawat Linac Tipe Clinac Cx. *J. Fis. UNAND.* **11**(1): 89.
15. Onkologi Medical Physics. 2024. Photon Dose Distributions. *Onkol. Med. Physics.com.*
<https://oncologymedicalphysics.com/photon-dose-distributions/>.