

Original paper

KOMPARASI DOSIS KELUARAN BERKAS FOTON DAN BERKAS ELEKTRON PADA PESAWAT *LINEAR ACCELERATOR* VARIAN *TRUE BEAM* TERHADAP *WATER PHANTOM*

Sulistiana¹, Syamsir Dewang^{1*}, Sri Dewi Astuty¹, Saleha²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin

²Instalasi Radioterapi Rumah Sakit TK.II Pelamonia Makassar, Indonesia

E-mail: dewang1163@gmail.com

Received: 1 Juli 2024; revised: 11 Juli 2024; accepted: 15 Juli 2024

ABSTRAK

Metode radioterapi merupakan salah satu pilihan pengobatan dalam mengatasi penyakit kanker. Peralatan radioterapi yang digunakan untuk pengobatan kanker adalah Linear Accelerator. Linac bekerja dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi untuk mempercepat partikel bermuatan, menghasilkan radiasi berupa berkas foton dan elektron. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kondisi Linac selama penggunaannya, agar tetap sesuai dengan rentang deviasi yang ditetapkan oleh Protokol TRS 398. Data penelitian diperoleh melalui analisis ionisasi chamber, suhu, tekanan, efek polaritas, dan rekombinasi ion. Pengujian dilakukan dengan menggunakan berkas foton pada energi 6 MV, 10 MV, dan 6 FFF, serta berkas elektron dengan energi 6 MeV, 9 MeV, dan 12 MeV. Parameter lain yang diterapkan meliputi luas lapangan 10 cm × 10 cm dan jarak Source to Surface Distance (SSD) sebesar 100 cm. Hasil analisis menunjukkan berkas energi 6 MV didapatkan nilai deviasi 1,47 %, energi 10 MV 1,52 %, dan untuk energi 6 FFF didapatkan nilai deviasi 1,39 %. Pada berkas elektron energi 6 MeV didapatkan nilai dengan deviasi 1,28 %, pada energi 9 MeV didapatkan nilai dengan deviasi 1,39 %, dan pada berkas elektron energi 12 MeV didapatkan nilai dengan deviasi 1,97 %. Berdasarkan hasil tersebut, keluaran berkas radiasi sinar-X pada pesawat linear accelerator di Rumah Sakit TK.II Pelamonia Makassar telah memenuhi standar Technical Report Series 398 IAEA, dengan rentang deviasi pengukuran yang masih berada dalam batas toleransi ±2%.

Kata kunci: *Linear Accelerator (Linac), Sinar-X, Technical Report Series (TRS) 398*

PENDAHULUAN

Linear accelerator (Linac) adalah perangkat yang menggunakan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi untuk mempercepat partikel bermuatan, sehingga menghasilkan radiasi berupa berkas foton dan elektron [1]. Berkas foton berenergi tinggi ini tercipta ketika elektron yang telah dipercepat menumbuk target tungsten yang tebal. Namun, radiasi foton yang dihasilkan oleh alat radioterapi seperti Linac atau Co-

60 bukanlah foton murni, melainkan merupakan campuran antara foton dan sejumlah kecil elektron yang terbentuk dari interaksi berkas foton tersebut [2].

*Berkas foton yang dihasilkan oleh Linac terbentuk melalui proses *Bremsstrahlung*, yang menyebabkan berkas tersebut memiliki spektrum energi yang beragam atau heterogen [3]. Radiasi sinar-X yang dihasilkan memiliki intensitas tinggi pada arah sumbu target. Untuk*

mencapai kerataan (*flatness*) yang diperlukan pada berkas ini, digunakan filter pemerata (*flattening filter*) berbahan baja [4,5]. Energi foton yang saat ini dikembangkan oleh beberapa Rumah Sakit adalah FFF (*Flattening Filter Free*), salah satu kelebihan dari pesawat linier medik FFF adalah dapat digunakan untuk penyinaran lapangan kecil [6]. Berkas foton umumnya dimanfaatkan untuk penyinaran kanker yang berada dalam jaringan tubuh, seperti kanker payudara, kanker serviks, dan kanker nasofaring [7].

Pembentukan berkas elektron pada Linac tidak memerlukan penembakan elektron ke target. Elektron yang telah dipercepat diarahkan langsung menuju *primary collimator*, setelah itu elektron melewati *scattering foil* pada bagian *carousel*, yang berfungsi untuk menyebarkan berkas elektron. Selanjutnya, berkas elektron diarahkan ke *secondary collimator* untuk menghasilkan berkas dengan distribusi yang lebih merata [8]. Berkas elektron berenergi tinggi ini juga dapat memproduksi sinar-X yang digunakan dalam pengobatan kanker. Biasanya, berkas elektron digunakan untuk penyinaran kanker yang berada di permukaan atau dekat dengan permukaan tubuh, seperti kanker kulit [9]. Dosis radiasi dari berkas foton dan elektron ini dapat diukur untuk mengetahui tingkat keluaran radiasi yang diterima.

Pengukuran dosis radiasi harus mengacu pada standar, salah satunya adalah *Technical Report Series (TRS) 398* yang dikeluarkan oleh *International Atomic Energy Agency (IAEA)* pada akhir tahun 2000 [10]. TRS 398 merupakan panduan praktis internasional dalam dosimetri, yang menggunakan standar dosis serap air sebagai pedoman untuk menetapkan dosis radiasi dalam terapi eksternal [11]. Protokol TRS 398 IAEA merekomendasikan agar dosis keluaran radiasi tidak lebih dari $\pm 2\%$, penggunaan detektor ionisasi chip paralel untuk elektron dan detektor silinder untuk foton energi tinggi dengan pengukuran

berkas radiasi yang dikalibrasi secara langsung di dalam phantom air [12].

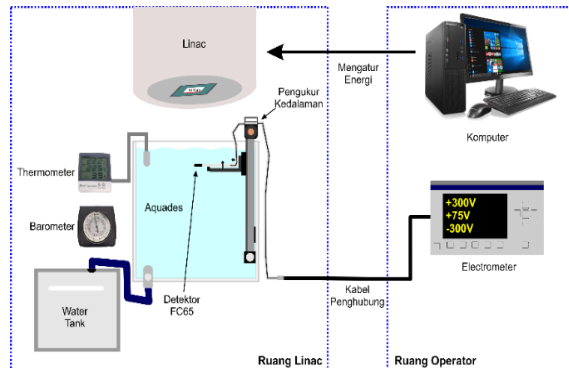
Penelitian tentang analisis keluaran berkas radiasi sinar-x telah dilakukan oleh Alya dkk. [13] dengan mengatur posisi detektor, dimana detektor tidak hanya diletakkan pada posisi sumbu, tetapi juga diletakkan pada 4 tepi bidang dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh letak detektor terhadap dosis yang diserap pada bidang Linac.

Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keluaran radiasi pesawat Linac menggunakan berkas foton dengan energi 6MV, 10 MV, 6 FFF dan berkas elektron dengan energi 6 MeV, 9 MeV, dan 12 MeV menggunakan pesawat Linac Varian *True Beam*.

METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan Juli - November 2024 di Instalasi Radioterapi Rumah Sakit TK. II Pelamonia Makassar, Sulawesi Selatan. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah pesawat Linear Accelerator Varian *True Beam*. Proses kalibrasi foton dimulai dengan meletakkan *phantom* diatas meja pemeriksaan Linac yang diisi dengan *aquades*. Setelah pengisian *phantom* selesai, detektor FC65 diatur pada *water phantom* dan memposisikan detektor dengan garis *cross line* hingga detektor menyentuh permukaan air dengan seimbang. Selanjutnya, detektor dihubungkan ke elektrometer (*Dose I*). Sebelum penyinaran dilakukan, suhu air dan tekanan udara diukur menggunakan termometer dan barometer. Pengukuran dilakukan dengan jarak *Source to Surface Distance (SSD)* sebesar 100 cm dan luas lapangan 10×10 cm². Penyinaran dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap energi berbeda dengan tegangan +300V, +75V, dan -300V. Setiap pengukuran dilakukan dengan kondisi yang sama, menggunakan energi 6 MV, 10 MV, dan 6 FFF Setelah kalibrasi selesai, penyinaran dilakukan dengan posisi detektor diatur pada kedalaman 100 mm. Penyinaran

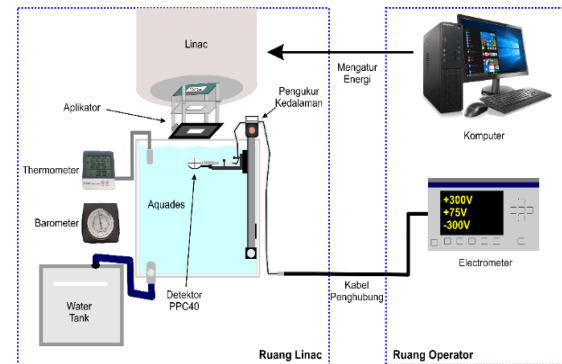
dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan untuk setiap tegangan yang berbeda. Proses pengkalibrasian detektor, termometer, dan barometer sebelum penyinaran dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengkalibrasian untuk pengukuran berkas foton.

Proses kalibrasi elektron dimulai dengan meletakkan *phantom* diatas meja pemeriksaan Linac kemudian memasang aplikator tepat dibawah kolimator. Tujuan dipasang kolimator pada pengukuran berkas elektron untuk memastikan bahwa berkas elektron fokus dan diarahkan dengan tepat. Setelah aplikator terpasang *phantom* diisi dengan *aquades*. Pengukuran berkas elektron dilakukan menggunakan detektor tipe PPC45. Setelah aplikator dipasang tepat dibawah kolimator dan *water phantom* sudah terisi, detektor diatur pada *water phantom* dan memposisikan detektor dengan garis *cross line* hingga detektor menyentuh permukaan air dengan seimbang kemudian detektor dihubungkan ke elektrometer. Sebelum dilakukan penyinaran, suhu air dan tekanan udara diukur menggunakan termometer dan barometer. Pengukuran dilakukan dengan SSD 100 cm dengan luas lapangn $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Penyinaran dilakukan sebanyak 3 kali disetiap energi yang berbeda dengan jumlah tegangan +300V, +75V, dan -300V. Setiap pengukuran dilakukan dengan kondisi yang sama dengan menggunakan energi 6 MeV, 10 MeV, dan 12 MeV. Setelah kalibrasi selesai, penyinaran dilakukan dengan posisi detektor diatur pada kedalaman yang

berbeda untuk setiap energi. Penyinaran dilakukan sebanyak 3 kali untuk setiap tegangan yang berbeda. Proses pengkalibrasian detektor, termometer, dan barometer sebelum penyinaran dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengkalibrasian untuk pengukuran berkas elektron.

Faktor Koreksi

Pengukuran faktor koreksi pada keluaran berkas radiasi di lakukan untuk menentukan laju dosis serap berkas di dalam air [12]. Pengukuran faktor koreksi dilakukan pada masing-masing energi foton 6 MV, 10MV, 6 FFF, dan elektron 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV. Faktor koreksi tersebut sebagai berikut:

- a) Faktor Koreksi Suhu dan Tekanan (K_{TP})

Pengukuran suhu dan tekanan (K_{TP}) dilakukan dengan melihat tekanan udara pada elektrometer (*Dose 1*) dan mengukur suhu air menggunakan termometer. Kemudian nilai suhu dan tekanan dihitung menggunakan persamaan (1) [7]:

$$K_{TP} = \left(\frac{273,15+T}{273,15+T_0} \right) \frac{P_0}{P} \quad (1)$$

Keterangan:

T: suhu rongga *chamber* yang berdasarkan suhu air disekitar *chamber* (°C)

P: tekanan udara saat pengukuran berlangsung (kPa)

P_0 : suhu referensi yang dicantumkan dalam sertifikat kalibrasi *chamber* (20 °C)

T_0 : tekanan referensi yang dicantumkan dalam sertifikat kalibrasi *chamber* (101,325 kPa)

b) Faktor Koreksi Elektrometer (K_{elec})

Faktor kalibrasi elektrometer, jika dalam sertifikat tidak dicantumkan faktor tersebut maka nilai K_{elec} adalah 1 dimana hal ini berarti *chamber* dikalibrasi bersamaan dengan elektrometer [14].

c) Faktor Koreksi Efek Polaritas (K_{pol})

Faktor koreksi respon detektor terhadap efek pergantian polaritas yang diberikan detektor. Untuk mengukur efek polaritas dapat dilihat dari persamaan (2) [12].

$$K_{pol} = \frac{[M_+] + [M_-]}{2M} \quad (2)$$

Keterangan:

M_+ : bacaan pengukuran pada polaritas positif (nC/MU)

M_- : bacaan pengukuran pada polaritas negatif (nC/MU)

M : bacaan dari polaritas yang rutin digunakan (nC/MU)

d) Faktor Koreksi Rekomendasi Ion (K_s)

Faktor koreksi respon detektor ionisasi terhadap kurang lengkapnya pengumpulan muatan pada ionisasi di udara yang dapat ditentukan dengan persamaan (3) [12].

$$K_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \quad (3)$$

Keterangan:

K_s : faktor koreksi rekombinasi ion

M_1 : muatan pada tegangan V_1

M_2 : muatan pada tegangan V_2

a_0, a_1, a_2 : koefisien kuadratik untuk perhitungan nilai K_s dengan menggunakan metode *two voltage* yang diambil dari Tabel 4.VII TRS 398 IAEA.

e) Respon Koreksi Detektor Ionisasi (K_{Q,Q_0})

Faktor koreksi ini telah ada pada Tabel 6.III untuk berkas foton dan Tabel 7.III untuk berkas elektron pada TRS 398 sebagai fungsi dari kualitas berkas $TPR_{20,10}$ terhadap kualitas berkas radiasi yang diberikan [12].

Penentuan Ionisasi Chamber

M_Q adalah pembacaan dosimeter dengan titik acuan chamber yang diposisikan pada Z_{ref} pada kualitas referensi Q_0 dan K_Q yang di pengaruhi oleh banyaknya suhu dan tekanan, kalibrasi elektrometer, efek polaritas dan rekombinasi ion. Nilai M_Q dapat ditentukan dengan persamaan (4).

$$M_Q = M_1 K_{TP} K_{elec} K_{pol} K_s \quad (4)$$

Keterangan :

M_1 : nilai rata-rata muatan pada saat pengukuran (nC/mu)

K_{TP} : faktor koreksi temperatur dan tekanan udara terhadap keadaan referensi

K_{elec} : faktor kalibrasi elektrometer, jika dalam sertifikat tidak dicantumkan faktor tersebut maka nilai K_{elec} adalah 1.

K_{pol} : faktor koreksi respon detektor ionisasi terhadap efek pergantian polaritas yang diberikan pada detektor

K_s : faktor koreksi rekombinasi ion

Pengukuran Keluaran Berkas Radiasi

Keluaran berkas radiasi Linac pada kedalaman referensi ekuivalen (Z_{ref}) ditentukan dengan pengukuran ionisasi menggunakan dosimeter *ion chamber*. Pengukuran dilakukan di dalam fantom air yang berukuran (36 x 42 x 36) cm³, luas lapangan penyinaran (10 x 10) cm, dan *Source to Surface Distance* (SSD) 100 cm.

a) Pada Kedalaman Referensi (Z_{ref})

Nilai keluaran berkas radiasi pada kedalaman referensi dapat dihitung menggunakan persamaan (5) [14].

$$D_{w,Q}(Z_{ref}) = M_Q N_{D,w,Q_0} K_{Q,Q_0} \quad (5)$$

Keterangan:

$D_{w,Q}(Z_{ref})$: dosis serap pada kedalaman Z_{ref} (cGy/MU)

M_Q : dosimeter pembaca (nC/MU)

N_{D,w,Q_0} : koefisien kalibrasi dalam hal dosis serap air pada kualitas referensi Q_0 . Nilai N_{D,w,Q_0} untuk radiasi foton *ion*

chamber farmer adalah $4,809 \times 10^7$ Gy/C, dan pada *ion chamber plane parallel* adalah $8,663 \times 10^7$ Gy/C.

K_{Q,Q_0} : faktor koreksi perbedaan antara respon detektor ionisasi dalam kualitas berkas yang digunakan sebagai kalibrasi detektor (Co-60) terhadap kualitas berkas.

b) Pada Kedalaman Maksimum (Z_{max})
 Penentuan keluaran berkas elektron dan berkas foton pada kedalaman maksimum bertujuan untuk mengatur bacaan detektor monitor dalam satuan MU sehingga 1 cGy sama dengan 1 MU. Penentuan dosis serap pada kedalaman maksimum dapat dihitung menggunakan persamaan (6) [14].

$$D_{W,Q(z_{max})} = \frac{100D_{W,Q(z_{ref})}}{PDD_{(z_{ref})}} \quad (6)$$

Keterangan :

$D_{W,Q(z_{ref})}$: dosis serap pada kedalaman Z_{ref} (cGy/MU)

$PDD_{(z_{ref})}$: nilai persentase untuk pengukuran di kedalaman Z_{ref} (%)

c) Presentase Nilai Deviasi

Penentuan nilai deviasi dilakukan untuk mengetahui nilai penyimpangan dalam pengukuran. Nilai deviasi dapat dihitung menggunakan persamaan (7) [12].

$$\text{Deviasi} = \frac{D_{W,Q(z_{max})} - D_{TPS}}{D_{TPS}} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan:

$D_{W,Q(z_{max})}$: dosis pada kedalaman maksimum

D_{TPS} : dosis pada TRS 398

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran Keluaran Radiasi Foton

Pengukuran nilai muatan dilakukan untuk menentukan nilai faktor koreksi dari keluaran berkas foton. Pengukuran dilakukan dengan mengukur suhu air dan kelembaban udara pada kedalaman 100 mm didalam air dengan dosis penyinaran

sebesar 100 MU. Penyinaran dilakukan sebanyak 3 kali disetiap energi dengan jumlah tegangan +300, +75, dan -300. Energi yang digunakan pada berkas foton adalah 6 MV, 10 MV, dan 6 FFF. Tabel 1 merupakan data pengukuran jumlah muatan rata-rata untuk menentukan nilai faktor koreksi.

Tabel 1. Data pengukuran jumlah muatan pada berkas foton.

Energi (MV)	V (Volt)	P (kPa)	T (°C)	M (nC/100 MU)
6 MV	300	101,3	21,2	14,02
	75	101,3	21,2	13,87
	-300	101,3	21,2	14,03
10 MV	300	101,3	21,2	15,73
	75	101,3	21,2	15,53
	-300	101,3	21,2	15,77
6 FFF	300	101,3	21,2	13,26
	75	101,3	21,2	12,99
	-300	101,3	21,2	13,27

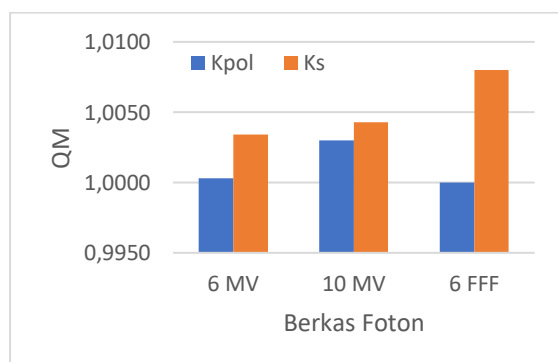
Berdasarkan Tabel 1, diperoleh nilai jumlah muatan dengan memvariasikan energi foton. Pengukuran dilakukan dengan 3 kali penyinaran pada setiap energi untuk mendapatkan hasil yang akurat. Pengukuran dilakukan dengan variasi tegangan +300V, -300V untuk menghitung nilai faktor koreksi polaritas dengan jumlah yang sama tetapi berlawanan. Sedangkan, untuk menghitung nilai faktor koreksi rekombinasi ion (K_s) digunakan tegangan 75V yang merupakan $\frac{1}{4}$ dari tegangan sebelumnya. Pada pengukuran suhu (T) dan tekanan didapatkan nilai yang konstan disetiap energi yaitu 21,2 °C dan 101,3 kPa hal tersebut disebabkan karena faktor penempatan dari alat ukur yang digunakan. Untuk nilai muatan terhadap variasi energi diperoleh nilai yang fluktuatif.

Berdasarkan Tabel 1, untuk jumlah muatan yang diperoleh selanjutnya dapat ditentukan nilai faktor koreksi. Hasil perhitungan faktor koreksi pada berkas foton pesawat Linac yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai perhitungan faktor koreksi keluaran berkas foton.

Faktor Koreksi	Energi		
	6 MV	10 MV	6 FFF
K_{TP}	1,007	1,007	1,007
K_{elec}	1	1	1
K_{pol}	1,0003	1,0003	1
K_s	1,0034	1,0043	1,0080
$K_{Q,Q0}$	0,994	0,984	0,997

Berdasarkan Tabel 2, diperoleh nilai faktor koreksi suhu dan tekanan (K_{TP}) diperoleh nilai yang sama untuk semua energi, hal tersebut disebabkan karena hasil pengukuran suhu (T) memiliki nilai yang sama dan memiliki nilai tekanan (P) yang konstan. Nilai K_{elec} disemua energi adalah 1 dimana hal ini berarti *chamber* dikalibrasi bersamaan dengan elektrometer [14]. Untuk nilai faktor koreksi K_{pol} dan K_s diperoleh nilai yang berbeda, hasil yang diperoleh untuk nilai K_{pol} dan K_s dapat dilihat dari Gambar 3.



Gambar 3. Grafik nilai presentase K_{pol} dan K_s pada berkas Foton.

Dua parameter yaitu K_{pol} dan K_s pada berkas foton dengan tiga jenis energi

berbeda 6 MV, 10 MV, dan 6 FFF. Perbedaan nilai pada grafik ini disebabkan oleh variasi muatan yang dihasilkan pada setiap tegangan, di mana perhitungan K_{pol} menggunakan selisih nilai muatan pada tegangan +300 V dan -300 V untuk masing-masing energi. Sementara itu, K_s dihitung berdasarkan rasio antara muatan yang diperoleh pada tegangan +300 V (M1) dan +75 V (M2). Dari grafik, terlihat bahwa nilai K_{pol} mendekati 1 di seluruh rentang energi, dengan nilai berkisar antara 0,998 hingga 1,002. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh tegangan polarisasi terhadap pengukuran sangat kecil, dan tegangan yang diterapkan pada detektor sudah cukup optimal untuk menjaga akurasi pengukuran tanpa adanya distorsi yang signifikan. Sebaliknya, nilai K_s lebih tinggi dibandingkan K_{pol} , dengan kisaran 1,004 hingga 1,008, dan mencapai nilai maksimum pada energi 6 FFF.

Perhitungan *output* berkas foton dilakukan pada kedalaman referensi (Z_{ref}) dan kedalaman maksimum (Z_{max}). Pengukuran *output* berkas radiasi dilakukan untuk mengetahui kondisi Linac selama digunakan, tetap mengacu pada protokol TRS 398. Data nilai perhitungan *output* berkas foton dapat dilihat pada Tabel 3.

Pada Tabel 3, diperoleh nilai M_Q untuk menghitung nilai keluaran pada kedalaman (Z_{ref}). Pada energi 6 MV diperoleh nilai keluaran berkas foton pada kedalaman referensi (Z_{ref}) 0,6722 cGy/MU dan pada kedalaman maksimum (Z_{max}) 1,0147 cGy/MU, pada energi 10 MV diperoleh nilai pada kedalaman referensi (Z_{ref}) 0,7472 cGy/MU dan pada kedalaman maksimum (Z_{max}) 1,0152 cGy/MU, dan pada energi 6 FFF diperoleh nilai keluaran berkas foton pada kedalaman referensi (Z_{ref}) 0,6405 cGy/MU dan pada kedalaman maksimum (Z_{max}) 1,0139 cGy/MU. Dari hasil yang diperoleh pada kedalaman maksimum (Z_{max}) disetiap energi sehingga didapatkan nilai penyimpangan pada energi 6 MV 1,47 %, 10 MV 1,52 %, dan energi 6 FFF 1,39 %.

Tabel 3. Nilai perhitungan output berkas foton.

Energi (MV)	MQ	Keluaran Pada Kedalaman Referensi (Z_{ref})	Keluaran Pada Kedalaman Maksimum (Z_{max})	Nilai Deviasi
6 MV	0,1417 nC/MU	0,6722 cGy/MU	1,0147 cGy/MU	1,47 %
10 MV	0,1591 nC/MU	0,7472 cGy/MU	1,0152 cGy/MU	1,52 %
6 FFF	0,1346 nC/MU	0,6405 cGy/MU	1,0139 cGy/MU	1,39 %

Hasil Keluaran Berkas Elektron

Pengukuran nilai muatan dilakukan untuk menentukan nilai faktor koreksi dari keluaran berkas elektron. Pengukuran dilakukan dengan mengukur suhu air dan kelembaban udara pada kedalaman 100 mm didalam air dengan dosis penyinaran sebesar 100 MU. Penyinaran dilakukan sebanyak 3 kali disetiap energi dengan jumlah tegangan +300, +75, dan -300. Energi yang digunakan pada berkas foton adalah 6 MeV, 9 MeV, dan 12 MeV. Tabel 4 merupakan data pengukuran jumlah muatan rata-rata untuk menentukan nilai faktor koreksi.

Tabel 4. Data pengukuran jumlah muatan pada berkas elektron.

Energi (MeV)	V (Volt)	P (kPa)	T (°C)	M (nC/100 MU)
6 MeV	300	101,3	21,2	11,90
	75	101,3	21,2	11,71
	-300	101,3	21,2	11,86
9 MeV	300	101,3	21,2	12,31
	75	101,3	21,2	12,12
	-300	101,3	21,2	12,31
12 MeV	300	101,3	21,2	12,51
	75	101,3	21,2	12,28
	-300	101,3	21,2	12,49

Berdasarkan Tabel 4, diperoleh nilai jumlah muatan dengan memvariasikan energi elektron. Untuk menghitung nilai faktor koreksi dilakukan pengukuran suhu kelembaban dan pembacaan elektrometer. Pengukuran dilakukan dengan 3 kali penyinaran pada setiap energi untuk mendapatkan hasil yang akurat. Nilai tekanan didapatkan melalui pembacaan pada alat elektrometer. Pengukuran dilakukan dengan variasi tegangan +300V, -300V untuk menghitung nilai faktor koreksi polaritas dengan jumlah yang sama tetapi berlawanan. Sedangkan, untuk menghitung nilai faktor koreksi rekombinasi ion (K_s) digunakan tegangan 75V yang merupakan $\frac{1}{4}$ dari tegangan sebelumnya. Pada nilai pengukuran suhu (T) didapatkan nilai yang konstan disetiap energi yaitu 21,2 °C hal tersebut disebabkan karena faktor penempatan dan nilai suhu. Untuk nilai muatan terhadap variasi energi diperoleh nilai yang fluktuatif,

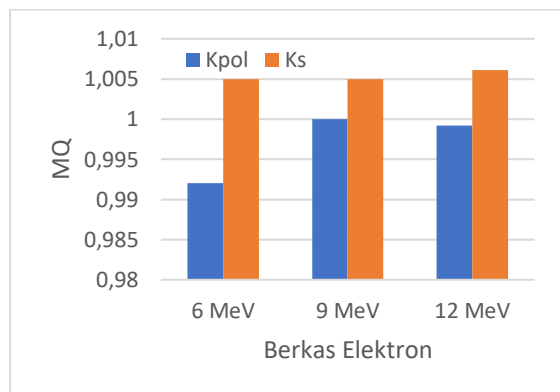
Berdasarkan Tabel 4, untuk jumlah muatan yang diperoleh selanjutnya dapat ditentukan nilai faktor koreksi. Hasil perhitungan faktor koreksi pada berkas foton pesawat Linac yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5, diperoleh nilai faktor koreksi suhu dan tekanan (K_{TP}) diperoleh nilai yang sama untuk semua energi, hal tersebut disebabkan karena hasil pengukuran suhu (T) memiliki nilai yang sama dan memiliki nilai tekanan (P) yang

konstan. Nilai K_{elec} disemua energi adalah 1 dimana hal ini berarti *chamber* dikalibrasi bersamaan dengan elektrometer [14]. Untuk nilai faktor koreksi K_{pol} dan K_S diperoleh nilai yang berbeda, hasil yang diperoleh untuk nilai K_{pol} dan K_S dapat dilihat dari Gambar 4.

Tabel 5. Nilai perhitungan faktor koreksi keluaran berkas electron.

Faktor Koreksi	Energi		
	6 MeV	9 MeV	12 MeV
K_{TP}	1,004	1,004	1,004
K_{elec}	1	1	1
K_{pol}	0,9920	1	0,9992
K_S	1,0052	1,0050	1,0061
$K_{Q,Q0}$	0,937	0,9235	0,912



Gambar 4. Grafik nilai presentase K_{pol} dan K_S pada berkas Elektron.

Presentase nilai K_{pol} dan K_S , pada energi berkas elektron dengan variasi energi 6 MeV, 9 MeV, dan 12 MeV. Dalam grafik, nilai K_S lebih tinggi dibandingkan K_{pol} pada semua tingkat energi. Nilai K_S tetap stabil di sekitar angka 1.005 tanpa perubahan yang signifikan meskipun energi elektron meningkat. Sebaliknya, K_{pol} menunjukkan peningkatan, mulai dari sedikit di bawah 0.99 pada energi 6 MeV, kemudian naik secara bertahap hingga mendekati 1 pada energi 12 MeV. Pada energi 9 MeV, nilai K_{pol} mencapai 1, yang disebabkan oleh

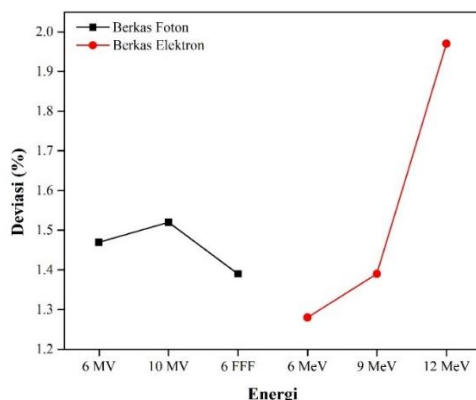
selisih muatan yang lebih besar dibandingkan dengan energi lainnya. Nilai K_{pol} diperoleh melalui perhitungan muatan yang dihasilkan pada tegangan +300 V dan -300 V untuk masing-masing energi. Sementara itu, variasi pada faktor koreksi rekombinasi ion (K_S) dipengaruhi oleh rasio muatan yang diperoleh pada tegangan +300 V (M1) dan +75 V (M2). Perbedaan pola antara K_{pol} dan K_S menunjukkan bahwa kedua parameter ini merespons perubahan energi elektron secara berbeda. Stabilitas nilai K_S di seluruh tingkat energi menunjukkan bahwa parameter ini tidak terlalu dipengaruhi oleh variasi energi berkas elektron. Sebaliknya, peningkatan K_{pol} mengindikasikan bahwa energi elektron memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap parameter tersebut.

Perhitungan *output* berkas elektron dilakukan pada kedalaman referensi (Z_{ref}) dan kedalaman maksimum (Z_{max}). Data nilai perhitungan *output* berkas elektron dapat dilihat pada Tabel 6.

Berdasarkan Tabel 6, diperoleh nilai M_Q yang dihitung menggunakan Persamaan 2.4 disetiap energi untuk menghitung nilai *output* pada kedalaman (Z_{ref}). Pada energi 6 MeV, keluaran berkas elektron pada kedalaman referensi (Z_{ref}) tercatat sebesar 0,9858 cGy/MU. Nilai ini merupakan keluaran terendah karena mutan yang dihasilkan juga memiliki nilai paling rendah [15]. Pada kedalaman maksimum (Z_{max}) 0,9871 cGy/MU, pada energi 9 MeV diperoleh nilai keluaran berkas elektron pada kedalaman referensi (Z_{ref}) 1,0132 cGy/MU dan pada kedalaman maksimum (Z_{max}) 1,0139 cGy/MU, dan pada energi 12 MeV diperoleh nilai keluaran berkas elektron pada kedalaman referensi (Z_{ref}) 1,0167 cGy/MU dan pada kedalaman maksimum (Z_{max}) 1,0197 cGy/MU. Dari hasil yang diperoleh pada kedalaman maksimum (Z_{max}) disetiap energi sehingga didapatkan nilai penyimpangan pada 6 MeV 1,28 %, 9 MeV 1,39 %, dan 12 MeV 1,97 %.

Tabel 6. Nilai perhitungan output berkas elektron.

Energi (MV)	MQ	Keluaran Pada Kedalaman Referensi (Z_{ref})	Keluaran Pada Kedalaman Maksimum (Z_{max})	Nilai Deviasi
6 MeV	0,1191 nC/MU	0,9858 cGy/MU	0,9871 cGy/MU	1,28 %
9 MeV	0,1242 nC/MU	1,0132 cGy/MU	1,0139 cGy/MU	1,39 %
12 MeV	0,1262 nC/MU	1,0167 cGy/MU	1,0197 cGy/MU	1,97 %



Gambar 5. Grafik nilai deviasi berkas foton dan berkas elektron.

Adapun grafik perbandingan nilai deviasi antara berkas foton dan elektron dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, perbandingan nilai deviasi pada dua jenis berkas radiasi, yaitu berkas foton dan berkas elektron. Nilai deviasi memiliki tingkat perbedaan antara nilai pengukuran aktual dengan nilai acuan, di mana deviasi yang lebih kecil menunjukkan pengukuran yang lebih akurat. Pada berkas foton, deviasi terlihat relatif stabil di semua energi yang diuji. Pada energi 6 MV, deviasi berada di sekitar 1,47%, kemudian sedikit meningkat menjadi 1,52% pada energi 10 MV, dan kembali menurun menjadi 1,39% pada energi 6 FFF (*Flattening Filter Free*). Hal ini menunjukkan bahwa perubahan energi pada berkas foton tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap akurasi pengukuran, dengan variasi deviasi yang

tetap kecil dan konsisten. Sebaliknya, berkas elektron menunjukkan nilai deviasi pada energi 6 MeV, berada di sekitar 1,28%. Namun, ketika energi meningkat menjadi 9 MeV, deviasi naik menjadi 1,39%. Kenaikan ini semakin terlihat signifikan pada energi 12 MeV, di mana deviasi mencapai 1,97 %. Meningkatnya nilai deviasi ini menunjukkan bahwa pengukuran berkas elektron menjadi lebih sulit seiring dengan bertambahnya energi. Dari analisis yang didapatkan berkas foton memiliki deviasi yang lebih stabil dibandingkan dengan berkas elektron, yang cenderung meningkat tajam pada energi tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa untuk pengukuran yang memerlukan akurasi tinggi, berkas foton lebih andal, sedangkan berkas elektron pada energi tinggi memerlukan perhatian ekstra dalam kalibrasi dan pengukuran untuk meminimalkan deviasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, keluaran berkas radiasi sinar-X pada pesawat *Linear Accelerator (Linac) Varian True Beam* di Rumah Sakit TK.II Pelamonia Makassar telah memenuhi standar yang ditetapkan dalam Technical Report Series (TRS) 398 oleh IAEA. Nilai keluaran untuk berkas foton dan elektron menunjukkan deviasi yang masih berada dalam batas toleransi $\pm 2\%$. Hasil analisis menunjukkan bahwa

nilai deviasi keluaran berkas radiasi untuk berkas foton berkisar antara 1,39% hingga 1,52%, sedangkan untuk berkas elektron nilai deviasi berkisar antara 1,28% hingga 1,97%. Seluruh hasil deviasi berada dalam batas toleransi $\pm 2\%$ yang diatur oleh standar TRS 398, sehingga kinerja pesawat Linac ini dapat dikategorikan sesuai dengan standar internasional untuk memastikan keakuratan dan keamanan dalam terapi radiasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Khan FM. *The Physics of Radiation Therapy 3rd ed.* Lippincott Williams & Wilkins. 2003.
- [2] Yani S, Dirgayussa IGE, Rhani MF, Soh RCX, Haryanto F, Arif I. Monte Carlo study on electron contamination and output factors of small field dosimetry in 6 MV photon beam. *Smart Science*. 2016;4(2):87–94.
- [3] Mayles P, Nahum A, Rosenwald JC. *Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice* (2nd ed.). CRC Press. 2007.
- [4] Podgorsak EB. *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. International Atomic Energy Agency. 2005.
- [5] Xirau IT. *Patient-specific in-vivo QA in MRGRT: 3D EPID dosimetry for the Unity MR-linac*. Doctoral Thesis, Leiden University. <http://hdl.handle.net/1887/136754>
- [6] Firmansyah OA & Firmansyah AF. Analisis penentuan PDD berkas foton 6 dan 10 MV *Free Flattening Filter* (FFF) pada lapangan kecil menggunakan tiga detektor yang berbeda. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*. 2019;20(2):1411–3481.
- [7] Milvita D, Mahyudin A, Vadila M. Analisis Keluaran Berkas Radiasi Sinar-X Pesawat Terapi LINAC Berdasarkan TRS 398 IAEA Pada Fantom Air Di Instalasi Radioterapi RS Universitas Andalas. *Jurnal Ilmu Fisika*. 2018;10(2):83–88.
- [8] Fitriani R, Subagiada K, Mulyono S, Stevenly RJS. Analisis Penggunaan Bolus Berbahan Plastisin pada Pasien Fibrosarcoma dengan Treatment Planning System (TPS). *Progressive Physics Journal*. 2022;3(1):100–109.
- [9] Metcalfe P, Kron T, Hoban P, Cutajar D, Hardcastle N. *The Physics of Radiotherapy X-Rays and Electrons* (3rd ed.). Medical Physics Pub Corp. 2023.
- [10] Setiawan H & Widita R. Analisis dosis keluaran berkas foton dan elektron energi tinggi pesawat Linac Elekta Precise 5991 berdasarkan Code of Practice IAEA TRS 398. *Prosiding SKF 2016*. Institut Teknologi Bandung, 14-15 Desember 2016. pp 180-186.
- [11] Sugiarta K, Ratini NN, Suyanto H. (2022). Analisis dosis keluaran berkas sinar-X pesawat Linac Varian Clinac CX berdasarkan protokol dosimetri IAEA TRS 398. *Kappa Journal*. 2022;6(2):366–372.
- [12] International Atomic Energy Agency. *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water (Technical Report Series No.398)*. Vienna: IAEA. 2000.
- [13] Alya N, Stevenly RJ, Wardani PS, Putri ER. Effect of Radiation Position of Photon Beam at Axis Point and Field Edge on Absorbed Dose on Linear Accelerator (Linac). *Jurnal Inovasi Teknologi dan Rekayasa*. 2024;9(1):103–110.
- [14] Cahyaningtyas SI, Anggraini RM, Fendriani Y. Analisis Keluaran Berkas Radiasi Sinar-X pada Pesawat Linear Accelerator (LINAC) Berdasarkan TRS 398 IAEA di RSUD Arifin

Achmad Provinsi Riau. *Jurnal Fisika Unand (JFU)* 2024;13(2):282–289.
[15] Puspitasari RA, Pertiwi WI, Sholihah PM, Fariqoh WH, Kavilani N, Astuti

SD. Analisis Kualitas Berkas Radiasi LINAC Untuk Efektivitas Radioterapi. *Jurnal Biosains Pascasarjana*. 2020;22:11-19.