

Analisis Keluaran Berkas Radiasi Sinar-X pada Pesawat *Linear Accelerator* (LINAC) Berdasarkan TRS 398 IAEA di RSUD Arifin Achmad Provinsi Riau

Saphira Indah Cahyaningtyas, Rista Mutia Anggraini, Yoza Fendriani*

Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, 36361, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 14 Oktober 2023
Direvisi: 28 Desember 2023
Diterima: 2 Februari 2024

Kata kunci:

Linear Accelerator (Linac)
Sinar-X
TRS 398 IAEA
Water Phantom

Keywords:

Linear Accelerator
X-Ray
TRS 398 IAEA
Water Phantom

Penulis Korespondensi:

Yoza Fendriani
Email: yozafendriani@unja.ac.id

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang analisis keluaran berkas radiasi sinar-X pada pesawat *Linear Accelerator* (Linac). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui keluaran berkas radiasi pada pesawat Linac menunjukkan nilai 1 cGy atau sama dengan 1 MU, yang diperoleh dari analisis ionisasi chamber, suhu, tekanan, efek polaritas, dan rekombinasi ion. Penelitian ini dilakukan menggunakan energi foton sebesar 6 MV dan energi elektron dengan variasi (4, 6, 8, 10, 12, dan 15) MeV. Luas lapangan yang digunakan yaitu 10 cm x 10 cm serta *source to surface distance* (SSD) 100 cm. Hasil analisis menunjukkan berkas energi foton 6 MV didapatkan nilai keluaran per 1 MU sebesar 1,0046 cGy/MU dengan deviasi 0,46%. Sedangkan pada berkas elektron energi 4 MeV sebesar 1,0112 cGy/MU dengan deviasi 1,12%, energi 6 MeV sebesar 1,0064 cGy/MU dengan deviasi 0,64%, energi 8 MeV sebesar 0,9991 cGy/MU dengan deviasi 0,09%, energi 10 MeV sebesar 0,9987 cGy/MU dengan deviasi 0,13%, energi 12 MeV sebesar 0,9978 dengan deviasi 0,22% dan energi 15 MeV sebesar 1,0013 cGy/MU dengan deviasi 0,13%. Dalam hal ini keluaran berkas radiasi sinar-X pada pesawat Linac (*Linear Accelerator*) di RSUD Arifin Achmad Provinsi Riau telah sesuai dengan standar TRS 398 IAEA dengan rentang deviasi pengukuran yaitu $\pm 3\%$.

Research has been conducted on analyzing x-ray radiation beam output on a Linear Accelerator (Linac). This research aims to determine the output of the radiation beam on the Linac showing a value of 1 cGy or the same as 1 MU, obtained from analysis of chamber ionization, temperature, pressure, polarity effects, and ion recombination. This research used a photon energy of 6 MV and electron energies with variations of (4, 6, 8, 10, 12, and 15) MeV. The field area used is 10 cm x 10 cm and the source-to-surface distance (SSD) is 100 cm. The analysis results show that the 6 MV photon energy beam produces an output value per 1 MU of 1,0046 cGy/MU with a deviation of 0,46%. Meanwhile, in the 4 MeV electron beam, the energy is 1,0112 cGy/MU with a deviation of 1,12%, the 6 MeV energy is 1,0064 cGy/MU with a deviation of 0,64%, the 8 MeV energy is 0,9991 cGy/MU with a deviation 0,09%, 10 MeV energy of 0,9987 cGy/MU with a deviation of 0,13%, 12 MeV energy of 0,9978 with a deviation of 0,22%, and 15 MeV energy of 1,0013 cGy/MU with a deviation of 0,13%. In this case, the output of the X-ray radiation beam on the Linac (Linear Accelerator) at Arifin Achmad Regional Hospital, Riau Province is following the IAEA TRS 398 standard with a measurement deviation range of $\pm 3\%$.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Radioterapi merupakan terapi menggunakan radiasi pengion yang digunakan untuk mematikan sel kanker yang terdapat di dalam tubuh pasien (Winarno, 2021). Radiasi pengion adalah radiasi berenergi tinggi yang mampu melepaskan elektron dari atom dari medium yang dilaluinya. Radiasi pengion adalah radiasi dengan frekuensi sangat tinggi yang memiliki energi untuk memecahkan elektron yang terikat dengan menghasilkan elektron bebas yang saling bertabrakan untuk melepaskan elektron lainnya (Podgorsak, 2005). Radiasi pengion dapat berupa gelombang elektromagnetik seperti sinar-x dan sinar gamma dan juga dapat berupa partikel bermuatan seperti elektron atau partikel alfa (Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2013) Salah satu instrumen yang menggunakan radiasi pengion untuk terapi pada kanker adalah *Linear Accelerator* (Linac).

Linac merupakan alat untuk mempercepat partikel bermuatan (elektron) secara linier sehingga dapat menghasilkan berkas foton dan juga elektron. Berkas foton dengan energi besar dihasilkan oleh elektron yang dipercepat yang kemudian menabrak tungsten yang tebal. Berkas foton yang dihasilkan dari alat radioterapi seperti Linac atau Co-60, sebenarnya bukan lagi berkas foton murni melainkan campuran foton dan sejumlah kecil elektron yang dihasilkan oleh berkas foton (Yani et al., 2016). Berkas foton tersebut merupakan hasil dari proses *Bremsstrahlung* sehingga berkas foton yang dihasilkan oleh Linac memiliki spektrum energi yang heterogen (Mayles et al., 2007). Berkas foton biasanya digunakan untuk menyinari kanker yang berada di dalam jaringan tubuh seperti kanker payudara, kanker serviks, dan kanker nasofaring (Milvita et al., 2018).

Pembentukan berkas elektron pada Linac tidak perlu ditembakkan ke target. Elektron dipercepat langsung menuju *primary collimator*. Kemudian elektron diteruskan menuju ke *carrousel* dengan melewati *scattering foil*. Tujuannya adalah untuk menghamburkan berkas elektron. Berkas elektron kemudian diteruskan menuju *secondary collimator* untuk mendapatkan berkas elektron yang beragam (Fitriani et al., 2022). Berkas elektron berenergi tinggi dapat menghasilkan sinar-X yang dapat digunakan untuk mengobati kanker. Berkas elektron digunakan untuk menyinari kanker yang berada dipermukaan atau dekat permukaan tubuh seperti kanker kulit (Metcalf et al., 2007). Berkas foton dan elektron yang digunakan dapat diketahui dosis keluaran radiasi dengan melakukan pengukuran.

Pengukuran dosis radiasi dalam radioterapi harus dilakukan dengan tepat dan sesuai dengan standar, karena hal ini sangat penting untuk memeriksa dosis keluaran berkas radiasi dan kualitas alat yang akan digunakan untuk terapi radiasi. Pengukuran dosis radiasi harus sesuai standar salah satunya *Technical Report Series* (TRS) 398 yang ditetapkan oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA) pada akhir tahun 2000 (International Atomic Energy Agency, 2008). TRS 398 merupakan kode praktis internasional untuk dosimetri berdasarkan standar dosis serap air yang digunakan sebagai pedoman dalam menentukan dosis berkas radiasi untuk pesawat terapi eksternal. IAEA merekomendasikan ketidakakuratan pada dosis keluaran berkas radiasi yaitu $\pm 3\%$, dengan mengacu pada nilai 1 cGy atau sama dengan 1 MU (Sugiarta et al., 2022).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui keluaran berkas radiasi pesawat Linac yang berada di RSUD Arifin Achmad Provinsi Riau dengan menunjukkan nilai 1 cGy atau sama dengan 1 MU (*Monitoring Unit*) baik untuk sumber foton maupun elektron sesuai protokol TRS 398 IAEA. Sebelum Linac digunakan maka perlu dilakukan analisis keluaran berkas radiasi terlebih dahulu agar dosis yang diterima pasien sesuai dengan jenis kanker, kedalaman kanker dan luas lapangan pada kanker serta sesuai dengan asas proteksi radiasi.

II. METODE

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah pesawat *Linear Accelerator*, barometer digunakan untuk mengukur tekanan udara, termometer digunakan untuk mengukur suhu, *water phantom* digunakan sebagai pengganti pasien, elektrometer digunakan untuk mengukur muatan yang mengalir,, aplikator digunakan untuk membuka target pada Linac, detektor ion chamber field dan reference digunakan untuk pengukuran relatif, detektor ion chamber marcus digunakan untuk mengukur keluaranberkas foton, detektor ion chamber cylinder digunakan untuk mengukur keluaran berkas elektron, kabel penghubung digunakan untuk menyambungkan berbagai komponen dan alat yang akan digunakan, dan komputer digunakan untuk mengontrol dalam pengukuran keluaran radiasi. Bahan yang digunakan adalah aquabides yaitu untuk mengisi *water phantom*. Pengukuran keluaran berkas radiasi ini dilakukan pada energi foton 6 MV serta variasi energi elektron 4 MeV, 6 MeV, 8 MeV, 10 MeV, 12

MeV, dan 15 MeV. Kemudian luas lapangan yang digunakan 10 cm x 10 cm dan *source-to-surface distance* (SSD) 100 cm. Langkah-langkah yang digunakan pada pengukuran keluaran radiasi sinar-X:

2.1 Faktor tekanan dan temperatur (k_{TP})

Pengukuran faktor koreksi ini dilakukan dengan cara mengukur nilai tekanan udara menggunakan barometer pada saat pengukuran berlangsung. Dan nilai suhu rongga chamber dapat dihitung menggunakan termometer pada saat pengukuran berlangsung. Untuk mengukur faktor koreksi ini dapat dilihat Persamaan 1.

$$k_{TP} = \frac{(273,2 + T)P_0}{(273,2 + T_0)P} \quad (1)$$

k_{TP} adalah faktor koreksi temperatur dan tekanan udara. P merupakan tekanan udara dan P_0 merupakan tekanan referensi sebesar 101,3 kPa. Kemudian T merupakan suhu rongga chamber dan T_0 merupakan suhu rongga chamber referensi 20°.

2.2 Elektrometer (k_{Elec})

Faktor kalibrasi elektrometer digunakan sebagai kuantitas pengaruh dan termasuk dalam faktor koreksi. Faktor kalibrasi elektrometer, jika dalam sertifikat tidak dicantumkan maka nilai k_{elec} adalah 1. Hal ini berarti chamber dikalibrasi bersamaan dengan elektrometer.

2.3 Efek polaritas (k_{pol})

Faktor koreksi respon detektor terhadap efek pergantian polaritas yang diberikan detektor. Untuk mengukur efek polaritas ini dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M} \quad (2)$$

Dalam hal ini polaritas yang diukur dengan memberikan tegangan tinggi dan tegangan rendah. Dimana M_+ merupakan bacaan pengukuran pada polaritas positif, M_- merupakan bacaan pengukuran pada polaritas negatif, dan M merupakan bacaan dari polaritas yang rutin digunakan.

2.4 Rekombinasi Ion (k_s)

Faktor rekombinasi respon detektor ionisasi terhadap kurang lengkapnya pengumpulan muatan ionisasi di udara. Faktor ini ditentukan dengan mengukur jumlah muatan pada tegangan yang biasa digunakan dan tegangan referensinya. Untuk mengukur rekombinasi ion ini dapat dilihat pada Persamaan 3.

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

Dimana a_0 , a_1 , a_2 merupakan koefisien kuadratik dan M_1 dan M_2 merupakan bacaan untuk tegangan V_1 dan V_2 . Ionisasi chamber atau bilik ionisasi merupakan modalitas dalam pengukuran jumlah ionisasi yang terjadi dalam rongga detektor. Bilik ionisasi digunakan dalam proses radioterapi untuk menentukan dosis radiasi. Untuk membaca bilik ionisasi dipengaruhi oleh tingkat suhu, tekanan, kalibrasi elektrometer, efek polaritas dan rekombinasi ion. Untuk pembacaan nilai dosimetri terkoreksi bilik ionisasi dapat dilihat pada Persamaan 4.

$$M_Q = M_1 \cdot k_{TP} \cdot k_{elec} \cdot k_{pol} \cdot k_s \quad (4)$$

Dimana M_1 merupakan pembacaan pada saat pengukuran, k_{TP} merupakan faktor koreksi tekanan dan temperatur, k_{elec} merupakan elektrometer, k_{pol} merupakan faktor koreksi polaritas, dan k_s merupakan rekombinasi ion. Setelah mengukur nilai M_Q maka dapat diukur keluaran berkas radiasi Linac pada kedalaman referensi ekuivalen (Z_{ref}). Untuk menentukan nilai dosis serap pada kedalaman Z_{ref} dapat dilihat pada Persamaan 5.

$$D_{w,Q(z_{ref})} = M_Q \cdot N_{D,w,Q_0} \cdot k_{Q,Q_0} \quad (5)$$

Dimana $D_{w,Q(z_{ref})}$ merupakan dosis serap pada kedalaman z_{ref} (cGy/MU), M_Q merupakan dosimeter pembaca (nC), N_{D,w,Q_0} merupakan koefisien kalibrasi dalam hal dosis serap pada kualitas referensi Q_0 , K_{Q,Q_0} faktor koreksi perbedaan antara respon detektor ionisasi dalam kualitas berkas yang digunakan sebagai kalibrasi detektor (Co-60) terhadap kualitas berkas. Setelah mendapatkan nilai PDD untuk kedalaman referensi maka dapat ditentukan nilai keluaran berkas radiasi sinar-X pada kedalaman maksimum. 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 dilihat pada Persamaan 6.

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

$D_{w,Q(z_{ref})}$ merupakan dosis serap pada kedalaman z_{ref} (cGy/MU), $PDD_{(z_{ref})}$ merupakan persentase untuk pengukuran di kedalaman z_{ref} (%). Setelah ditentukan keluaran berkas radiasi Linac pada kedalaman maksimum maka dapat ditentukan nilai deviasi. Berdasarkan (Technical Reports Series No. 398, 2000) dosis dari keluaran berkas radiasi dari pesawat Linac dengan nilai acuan yaitu 1 cGy/MU. Hal ini dapat dihitung menggunakan Persamaan 7.

$$Deviasi = \frac{\text{jumlah cacahan didapat} - \text{jumlah cacahan referensi}}{\text{jumlah cacahan referensi}} \times 100\% \quad (7)$$

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Pengukuran *Output* Absolut Foton

Pengukuran *output* absolut pada energi foton dilakukan dengan menghitung jumlah muatan berkas radiasi. Pengukuran dilakukan dengan mengukur suhu, tekanan dan kelembaban ruangan pada pesawat Linac menggunakan barometer dan temperatur. Energi yang digunakan pada berkas foton adalah 6 MV. Hasil data pengukuran jumlah muatan berkas foton dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Data pengukuran jumlah muatan pada berkas foton

Energi (MV)	Tegangan (V)	Tekanan (kPa)	Suhu (°C)	Rh %	Muatan (nC/MU)
6	(+400)	101,0	22,2	50	12,75
	(-400)				12,73
	(+100)				12,66

Berdasarkan Tabel 1, untuk jumlah muatan yang diperoleh selanjutnya dapat ditentukan nilai faktor koreksi. Tegangan yang digunakan pada energi foton yaitu +400 V, -400 V dan +100 V. Hasil perhitungan faktor koreksi pada berkas foton pesawat Linac yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Nilai faktor koreksi keluaran berkas foton

Faktor Koreksi	Energi 6 MV
K_{TP}	1,0105
K_{pol}	0,9992
K_{elec}	1
K_s	1,0023
K_{q,q_0}	0,9849
$PDD_{z_{ref}} (%)$	68,2

Berdasarkan Tabel 2 untuk menentukan nilai faktor koreksi efek polaritas (k_{Pol}) dapat dihitung menggunakan persamaan 2. Setelah itu, untuk menentukan nilai koefisien kuadratik (a_0 , a_1 , dan a_2) dapat dihitung dengan cara membagi nilai tegangan M_1 dan M_2 , kemudian, nilai koefisien kuadratik dapat dilihat pada tabel TRS 398 IAEA. Nilai (k_s) dapat dihitung menggunakan persamaan 3. Untuk nilai faktor koreksi elektrometer (k_{Elec}) adalah 1, karena *ionisasi chamber* dikalibrasi bersamaan dengan

elektrometer. Detektor *ionisasi chamber* yang digunakan yaitu *ionisasi chamber cylinder* 0,6. Untuk semua nilai faktor koreksi keluaran berkas radiasi foton pada energi 6 MV bernilai ± 1 . Hal ini berarti nilai faktor koreksi yang diperoleh dari penelitian ini telah sesuai dengan standar protokol TRS 398 IAEA. Selanjutnya, nilai faktor koreksi yang telah diperoleh digunakan untuk menghitung dosimeter pembaca (M_Q) menggunakan persamaan 4. Setelah diperoleh nilai dari M_Q , maka hasil perhitungan dapat digunakan untuk menghitung keluaran pada kedalaman z_{ref} pada energi foton sebesar 6 MV. Kemudian, untuk hasil perhitungan keluaran pada z_{ref} dan pada pengukuran z_{max} dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Penentuan keluaran berkas foton

Energi (MV)	Penentuan keluaran pada z_{max} (cGy/MU)	Deviasi keluaran berkas radiasi (%)
6	1,0046	0,46

Berdasarkan Tabel 3, untuk menentukan hasil keluaran berkas radiasi pada kedalaman z_{ref} dapat dihitung menggunakan persamaan 5. Selanjutnya, untuk menentukan hasil keluaran radiasi pada kedalaman z_{max} dapat dihitung menggunakan persamaan 6. Dari hasil perhitungan yang telah diperoleh pada tabel 3 hasil keluaran berkas radiasi pada energi foton masih menunjukkan nilai 1 cGy/MU. Pada energi 6 MV diperoleh hasil keluaran berkas foton pada kedalaman Z_{ref} sebesar 0,6852 cGy/MU dan pada kedalaman Z_{max} 1,0046 cGy/MU. Kemudian, untuk menentukan deviasi pada keluaran berkas radiasi elektron dapat dihitung menggunakan persamaan 7. Berdasarkan TRS 398 IAEA deviasi untuk keluaran berkas radiasi adalah 3%. Nilai deviasi foton pada energi 6 MV adalah 0,46%. Hasil keluaran berkas radiasi foton yang diperoleh pada energi 6 MV masih dalam batas toleransi protokol TRS 398 IAEA yaitu 3% dengan menunjukkan nilai 1 cGy/MU.

3.2 Pengukuran *Output Absolut Elektron*

Pengukuran *output* absolut elektron dilakukan dengan menghitung jumlah muatan berkas radiasi. Pengukuran dilakukan dengan mengukur suhu, tekanan dan kelembaban ruangan (k_{TP}) pada pesawat Linac. Energi yang digunakan pada berkas elektron adalah 4 MeV, 6 MeV, 8 MeV, 10 MeV, 12 MeV, dan 15 MeV. Hasil data pengukuran jumlah muatan berkas elektron yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Data pengukuran jumlah muatan pada berkas elektron

Energi (MeV)	Tegangan (V)	Tekanan (kPa)	Suhu (°C)	Rh (%)	Muatan (nC/MU)
4	(+300)	101,7	21,4	50	1,946
	(-300)				1,96
	(+100)				1,932
6	(+300)	101,0	21,5	50	1,924
	(-300)				1,949
	(+100)				1,907
8	(+300)	101,0	21,4	50	1,942
	(-300)				1,963
	(+100)				1,929
10	(+300)	101,0	21,4	46	1,956
	(-300)				1,977
	(+100)				1,94
12	(+300)	101,0	21,4	45	1,967
	(-300)				1,985
	(+100)				1,956
15	(+300)	101,0	21,4	45	1,962
	(-300)				1,981
	(+100)				1,946

Berdasarkan Tabel 4, untuk jumlah muatan yang diperoleh selanjutnya dapat ditentukan nilai faktor koreksi. Tegangan yang digunakan pada energi elektron yaitu +300 V, -300 V dan +100 V. Hasil perhitungan faktor koreksi pada berkas foton pesawat Linac yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Nilai faktor koreksi keluaran berkas elektron

Faktor Koreksi	Energi					
	4 MeV	6 MeV	8 MeV	10 MeV	12 MeV	15 MeV
K_{TP}	1,0111	1,0081	1,0078	1,0078	1,0078	1,0078
K_{Pol}	1,0036	1,0065	1,0054	1,0054	1,0046	1,0048
K_{Elec}	1	1	1	1	1	1
K_S	1,0035	1,0043	1,0040	1,0039	1,0027	1,0039
$K_{q,q0}$	0,926	0,92	0,914	0,909	0,905	0,899
$PDD_{z_{ref}}(\%)$	100	99,9	99,6	99,8	99,8	98,7

Berdasarkan Tabel 5, untuk menentukan hasil pengukuran faktor tekanan dan temperatur, dapat diukur menggunakan barometer dan termometer. Kemudian, hasil pengukuran dapat dihitung menggunakan persamaan 1. Pada hasil faktor koreksi suhu, tekanan, dan kelembaban (k_{TP}) yang telah diperoleh pada masing-masing energi nilainya berbeda. Untuk nilai efek polaritas (k_{Pol}) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.

Selanjutnya, untuk nilai faktor koreksi rekombinasi ion (k_S) yang telah diperoleh pada setiap energi hasilnya berbeda-beda. Hal ini dikarenakan jumlah muatan pada berkas radiasi elektron yang mengalir pada setiap detektor berbeda-beda. Setelah itu, untuk menentukan koefisien kuadratik (a_0 , a_1 , dan a_2) dapat dihitung dengan cara membagi nilai tegangan M_1 dan M_2 , kemudian, nilai koefisien kuadratik dapat dilihat pada tabel TRS 398. Nilai (k_S) dapat dihitung menggunakan persamaan 3. Untuk nilai faktor koreksi elektrometer (k_{Elec}) adalah 1, karena *ionisasi chamber* dikalibrasi bersamaan dengan elektrometer. Detektor *ionisasi chamber* yang digunakan yaitu *ionisasi chamber marcus*. Untuk semua nilai faktor koreksi keluaran berkas radiasi elektron pada energi 4 MeV, 6 MeV, 8 MeV, 10 MeV, 12 MeV, dan 15 MeV bernilai ± 1 . Hal ini berarti nilai faktor koreksi yang diperoleh dari penelitian ini telah sesuai dengan standar protokol TRS 398 IAEA. Selanjutnya, nilai faktor koreksi yang telah diperoleh digunakan untuk menghitung dosimeter pembaca (M_Q) menggunakan persamaan 4. Setelah diperoleh nilai dari M_Q , maka hasil perhitungan dapat digunakan untuk menghitung keluaran pada Z_{Ref} dan untuk menghitung keluaran pada z_{max} dengan variasi elektron 4 MeV, 6 MeV, 8 MeV, 10 MeV, 12 MeV, dan 15 MeV. Kemudian untuk hasil perhitungan keluaran pada kedalaman z_{ref} dan pada kedalaman z_{max} dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Penentuan keluaran berkas elektron

Energi (MeV)	Penentuan keluaran pada z_{max} (cGy/MU)	Deviasi keluaran berkas radiasi (%)
4	1,0112	1,12
6	1,0064	0,64
8	0,9991	0,09
10	0,9987	0,13
12	0,9978	0,22
15	1,0013	0,13

Berdasarkan Tabel 6, untuk menentukan hasil keluaran berkas radiasi pada kedalaman z_{ref} dapat dihitung menggunakan persamaan 5. Selanjutnya, untuk menentukan hasil keluaran radiasi pada kedalaman z_{max} dapat dihitung menggunakan persamaan 6. Dari hasil perhitungan yang telah diperoleh pada tabel 6 hasil keluaran berkas radiasi pada setiap energi masih menunjukkan nilai 1 cGy/MU. Pada energi 4 MeV diperoleh nilai keluaran berkas elektron pada kedalaman z_{ref} sebesar 1,9816 cGy/MU dan pada kedalaman z_{max} sebesar 1,0112 cGy/MU. Kemudian, untuk menentukan deviasi pada keluaran berkas radiasi elektron dapat dihitung menggunakan persamaan 7. Berdasarkan TRS 398 IAEA deviasi untuk keluaran berkas radiasi adalah $\pm 3\%$. Nilai deviasi elektron pada energi 4 MeV adalah 1,12%. Sama dengan energi 4 MeV, energi 6 MeV, 8 MeV, 10 MeV, 12 MeV, dan 15 MeV juga memiliki nilai

keluaran berkas radiasi elektron yang sama dengan menunjukkan nilai 1 cGy/MU dan deviasi yang masih berada dalam batas toleransi TRS 398 IAEA yaitu $\pm 3\%$.

Hasil keluaran berkas radiasi elektron yang diperoleh pada setiap energi masih dalam batas toleransi protokol TRS 398 IAEA yaitu $\pm 3\%$ dengan menunjukkan nilai 1 cGy/MU. Nilai deviasi pada keluaran radiasi pada berkas foton dan elektron masih dalam batas toleransi yaitu $\pm 3\%$ menunjukkan bahwa pesawat Linac masih aman untuk digunakan terapi pada pasien. Menurut Sugiarta, dkk (2020) jika terdapat penyimpangan dalam keluaran berkas radiasi pada pesawat Linac maka harus dilakukan *adjustment* untuk penyesuaian pada *panel control software* Linac agar mendapatkan nilai deviasi yang lebih rendah serta masih memenuhi batas toleransi yang direkomendasikan IAEA. Pengukuran berkas radiasi dilakukan untuk mengetahui kondisi pesawat linac tetap menunjukkan nilai 1 cGy atau sama dengan 1 MU, agar dosis yang keluar pada pesawat sesuai dengan jenis kanker, kedalaman kanker, serta asas proteksi radiasi.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil analisis data pengukuran dan perhitungan keluaran berkas radiasi foton pada pesawat Linac di Instalasi Radioterapi RSUD Arifin Achmad Provinsi Riau, diperoleh hasil keluaran pada energi 6 MV sebesar 1,0046 cGy/MU dengan deviasi 0,46%, dan masih dalam batas toleransi TRS 398 IAEA. Sedangkan pada berkas elektron diperoleh hasil keluaran pada energi 4 MeV sebesar 1,0112 cGy/MU dengan deviasi 1,12%, energi 6 MeV sebesar 1,0064 cGy/MU dengan deviasi 0,64%, energi 8 MeV sebesar 0,9991 cGy/MU dengan deviasi 0,09%, energi 10 MeV sebesar 0,9987 cGy/MU dengan deviasi 0,13%, energi 12 MeV sebesar 0,9978 dengan deviasi 0,22% dan energi 15 MeV sebesar 1,0013 cGy/MU dengan deviasi 0,13% dan masih dalam batas toleransi TRS 398 IAEA. Berdasarkan hasil analisis data keluaran berkas radiasi foton dan elektron pada pesawat Linac di Instalasi Radioterapi RSUD Arifin Achmad Provinsi Riau telah sesuai dengan standar TRS 398 IAEA, dengan menunjukkan nilai 1 cGy atau sama dengan 1 MU, serta deviasi berkas radiasi masih dalam batas toleransi yaitu $\pm 3\%$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada pihak Instalasi Radioterapi RSUD Arifin Achmad Provinsi Riau atas izin pengambilan data sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik dan terima kasih untuk semua pihak yang telah membantu kelancaran dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. (2013). Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. *Republik Indonesia*, 1–29.
- Fitriani, R; Subagiada, K; Mulyono, S; Stevenly, R. J. S. (2022). Analisis Penggunaan Bolus Berbahan Plastisin pada Pasien Fibrosarcoma dengan Treatment Planning System (TPS). *Progressive Physics Journal*, 3(1), 100–109.
- International Atomic Energy Agency. (2008). IAEA Technical Report Series. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 35(5), 1030–1031. <https://doi.org/10.1007/s00259-008-0767-4>
- Mayles, P.; Nahum, A.; Rosenwald, J. C. (2007). *Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice* (second Edi). CRC Press.
- Metcalf, P; Kron, T; Hoban, P; Cutajar, D; Hardcastle, N. (2007). *The Physics of Radiotherapy X-Rays and Electrons* (3rd Editio). Medical Physics Pub Corp.
- Milvita, D., Mahyudin, A., & Vadila, M. (2018). 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 | Universitas Andalas*, 10(2), 83–88.
- Podgorsak, E. . (2005). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. International Atomic Energy Agency.
- Sugiarta, K., Nyoman Ratini, N., & Suyanto, H. (2022). Analisis Dosis Keluaran Berkas Sinar-X Pesawat Linac Varian Clinac CX Berdasarkan Protokol Dosimetri IAEA TRS 398. *Desember 2022*, 6(2), 366–372. <http://e-journal.hamzanwadi.ac.id/index.php/kpj/index>

- TECHNICAL REPORTS SERIES No. 398. (2000). Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy.
- Winarno, W. (2021). Radioterapi Kanker Cervix Dengan Linear Accelerator (LINAC). *Jurnal Biosains Pascasarjana*, 23(2), 75. <https://doi.org/10.20473/jbp.v23i2.2021.75-86>
- Yani, S., Dirgayussa, I. G. E., Rhani, M. F., Soh, R. C. X., Haryanto, F., & Arif, I. (2016). Monte Carlo study on electron contamination and output factors of small field dosimetry in 6 MV photon beam. *Smart Science*, 4(2), 87–94. <https://doi.org/10.1080/23080477.2016.1195609>