

Evaluasi Hubungan Deviasi dan Energi terhadap Kestabilan Keluaran Berkas Elektron pada Pesawat LINAC Varian *TrueBeam*

Sakinah¹, Primasari Cahya Wardhani^{1*}, Arie Chintya Martania³, Nur Aini Fauziyah¹, Wahyu Dwi Lestari²

¹Fisika, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

²Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

³Instalasi Kalibrasi Alat Ukur Radiasi dan Radioterapi, Balai Pengamanan Alat dan Fasilitas Kesehatan (BPAFK) Surabaya, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 10 Agustus 2025
Direvisi: 15 September 2025
Diterima: 7 Januari 2026

Kata kunci:

Deviasi Energi
LINAC
Muatan listrik
TRS-398
Water Phantom

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara energi berkas elektron terhadap muatan listrik serta keterkaitannya dengan deviasi keluaran pesawat LINAC. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan analisis kuantitatif untuk mengetahui hubungan matematis antara energi, muatan, dan deviasi sebagai dasar ilmiah dalam menilai kestabilan sistem LINAC secara objektif. Pengukuran dilakukan di Balai Pengamanan Alat dan Fasilitas Kesehatan (BPAFK) Surabaya menggunakan pesawat Varian *TrueBeam* LINAC di Rumah Sakit X Jawa Timur, dengan variasi energi 6–18 MeV. Proses kalibrasi mengikuti standar IAEA TRS-398 pada kedalaman referensi (Z_{ref}) yang ditentukan berdasarkan nilai R_{50} dari data *Percentage Depth Dose* (PDD). Setiap pengukuran dilakukan lima kali pengulangan dengan variasi tegangan +300V, -300V, dan +75V, yang disesuaikan dengan tegangan kerja detektor *Advanced Markus* untuk memperoleh faktor koreksi polaritas dan rekombinasi ion. Hasil menunjukkan muatan maksimum sebesar 1,61 nC pada energi 12 MeV dan deviasi minimum -0,010% pada 9 MeV. Analisis regresi kuadratik memberikan nilai $R^2 = 0,97286$, yang mengindikasikan hubungan kuat antara energi dan muatan. Seluruh nilai deviasi berada dalam batas toleransi $\pm 2\%$ sesuai TRS-398, sehingga LINAC dinyatakan stabil dengan kesetaraan $1 \text{ MU} = 1 \text{ cGy}$ yang tetap terjaga di seluruh rentang energi elektron.

Keywords:

Energy Deviation
LINAC
Electric Charge
TRS-398
Water Phantom

Penulis Korespondensi:

Primasari Cahya Wardhani
Email:
primasari.cahya.fisika@upnjatim.ac.id

This study aims to analyze the relationship between electron beam energy and collected charge, as well as its correlation with the output deviation of the LINAC system. The novelty of this research lies in the application of quantitative analysis to establish a mathematical relationship among energy, charge, and deviation as a scientific basis for objectively evaluating the stability of the LINAC system. Measurements were carried out at the Medical Device and Facility Safety Center (BPAFK) Surabaya using a Varian TrueBeam LINAC at Hospital X, East Java, with energy variations ranging from 6 to 18 MeV. The calibration process followed the IAEA TRS-398 standard at the reference depth (Z_{ref}), determined based on the R_{50} value obtained from the Percentage Depth Dose (PDD) data. Each measurement was repeated five times with voltage variations of +300 V, -300 V, and +75 V, adjusted to the operating voltage of the Advanced Markus detector to obtain the polarity and ion recombination correction factors. The results showed a maximum charge of 1.61 nC at 12 MeV and a minimum deviation of -0.010% at 9 MeV. Quadratic regression analysis produced an R^2 value of 0.97286, indicating a strong correlation between energy and charge. All deviation values were within the $\pm 2\%$ tolerance limit as specified in TRS-398, confirming that the LINAC output remains stable with a consistent equivalence of $1 \text{ MU} = 1 \text{ cGy}$ across all electron energies.

Copyright © 2026 Author(s).

I. PENDAHULUAN

Radioterapi eksternal menggunakan *Linear Accelerator* (LINAC) merupakan salah satu cara utama dalam pengobatan kanker yang memanfaatkan berkas foton dan elektron untuk menghancurkan sel tumor dengan akurat (Sutapa et al., 2024). Di antara berbagai jenis radiasi, berkas elektron memiliki karakteristik fisik yang unik, yaitu memberikan dosis maksimum pada kedalaman dangkal dan mengalami penurunan tajam setelah mencapai kedalaman tertentu, sehingga sangat sesuai untuk pengobatan tumor superfisial (Khan & Gibbons, 2014). Kualitas terapi sangat dipengaruhi oleh akurasi parameter berkas elektron dihasilkan oleh LINAC, seperti hubungan dosis terhadap kedalaman *Percentage Depth Dose* (PDD), profil dosis lateral, homogenitas berkas, *flatness*, simetri, dan kestabilan output (Khan & Gibbons, 2014). Keluaran berkas elektron dapat mengakibatkan ketidaktepatan dalam penyampaian dosis radiasi kepada pasien, yang berpotensi mengurangi efektifitas terapi atau meningkatkan risiko terhadap jaringan sehat (Li et al., 2023). Deviasi dapat muncul akibat berbagai faktor, termasuk variasi energi, degradasi komponen LINAC, kesalahan kalibrasi, atau kondisi lingkungan seperti suhu dan tekanan yang dapat mempengaruhi pembacaan detektor (Tsuneda et al., 2023). Sehingga, pemantauan dan analisis menjadi bagian penting dari *quality assurance* (QA) untuk memastikan konsistensi keluaran berkas elektron LINAC.

Konsistensi keluaran berkas tidak hanya penting untuk menjaga kestabilan daya keluaran, tetapi juga menjadi dasar dalam penerapan konsep keseragaman antar mesin atau *beam matching* pada radioterapi. Dalam menjaga keseragaman keluaran hasil radioterapi, dikenal konsep *beam matching* yaitu penyelarasan karakteristik dosimetri antara mesin agar dapat digunakan saling bergantian tanpa perlu penyesuaian ulang pada perencanaan terapi. Pada studi Firmansyah et al., 2022 menunjukkan implementasi *beam matching* pada beberapa LINAC, dengan deviasi *flatness* <6%, simetri <3%, dan kedalaman dosis 80% (R80) <1 mm antar mesin yang menunjukkan pentingnya pengendalian deviasi (Firmansyah et al., 2021). Beberapa penelitian sebelumnya juga berfokus pada tantangan dalam menjaga keseragaman dosimetri berkas elektron, terutama pada energi rendah di mana penyimpanan kecil dapat menyebabkan perubahan signifikan pada spectrum energi dan distribusi dosis (Taprogge et al., 2021). Evaluasi dosimetri eksternal telah diakui secara internasional sebagai metode yang paling efektif untuk memastikan kesesuaian hasil pengukuran dosis dengan standar referensi (Kron et al., 2013).

Meskipun telah banyak penelitian yang membahas kalibrasi dosimetri dan *beam matching*, kajian spesifik mengenai hubungan kuantitatif antara deviasi dosis keluaran dan variasi energi berkas elektron pada pesawat LINAC Varian *TrueBeam* masih sangat terbatas, terutama dalam hal keterkaitan antara nilai deviasi, kestabilan muatan listrik, serta respon detektor terhadap variasi tegangan untuk sumber berkas elektron. Selain itu, sebagian besar studi yang telah dilakukan hanya membahas seputar nilai deviasi dan korelasinya dengan nilai energi dari LINAC. Pada penelitian terdahulu, pengukuran nilai deviasi dilakukan tanpa menghubungkan secara langsung mengenai perubahan energi terhadap kestabilan muatan listrik yang diukur pada kondisi klinis aktual di RS X. Padahal, hubungan antara perubahan energi terhadap kestabilan muatan listrik tersebut penting untuk menilai keandalan *system* LINAC terhadap perubahan kondisi operasional dan dapat digunakan untuk menentukan rentang energi yang paling efektif sebagai acuan pada *quality assurance* (QA). Penelitian ini mengidentifikasi adanya keterbatasan penelitian terdahulu dalam menganalisis hubungan matematis antara energi elektron, deviasi, dan muatan listrik yang dihasilkan. Pada studi sebelumnya (Khiftiyah, 2014); (Hasanah et al., 2020); (Guritna et al., 2017) hanya menilai kualitas berkas tanpa menelusuri korelasi kuantitatif antar parameter, sedangkan penelitian lain (Puspitasari, 2020) belum memberikan rekomendasi energi yang optimal berdasarkan kestabilan kinerja. Dengan demikian, penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menganalisis hubungan deviasi antar energi terhadap kestabilan keluaran berkas elektron serta hubungan antara energi elektron dengan muatan listrik yang dihasilkan pada pesawat LINAC Varian *TrueBeam*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baru dalam aspek evaluasi kestabilan dosimetri, serta menjadi dasar dalam peningkatan prosedur QA dan rekomendasi energi optimal untuk terapi radiasi. Meskipun berbagai studi telah mengulas karakteristik dosimetri berkas elektron, analisis komprehensif yang menghubungkan deviasi berkas elektron dengan variasi energi masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan pendekatan yang menghubungkan parameter energi, muatan listrik, dan deviasi untuk mengevaluasi stabilitas kinerja LINAC serta mendukung peningkatan akurasi dosis dan pemilihan energi berkas elektron yang paling efektif dalam radioterapi.

II. METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2025 di Balai Pengamanan Alat dan Fasilitas Kesehatan (BPAFK) Surabaya khususnya Instalasi Kalibrasi Alat Ukur Radiasi dan Radioterapi (KAUR). Bahan yang digunakan pada penelitian ini aquadest sedangkan untuk alat yaitu Varian *TrueBeam* LINAC di salah satu Rumah Sakit X di Jawa Timur dengan sumber radiasi elektron (6 MeV, 9 MeV, 12 MeV, 16 MeV, dan 18 MeV), Water Phantom berukuran 30cm×30cm×30cm, *Electrometer* PTW Unidos Webline model T10022, Termometer celup, *Hygrobarometer*, pelurus laser, *Waterpass*, detektor Advanced Markus, dan kabel *extension*.



Gambar 1 Diagram proses pengukuran jumlah muatan listrik (nC)

Pengukuran diawali dengan pengisian aquadest ke dalam *water phantom*, pengaturan jarak sumber radiasi ke permukaan phantom (SSD) sejauh 100 cm dengan lapangan radiasi 10 cm × 10 cm, serta penyambungan detektor dengan *electrometer* yang berada di luar ruang pesawat LINAC. Kalibrasi berkas elektron dilakukan dengan mengukur ionisasi pada kedalaman referensi (Z_{ref}), di mana posisi detektor dalam *water phantom* ditentukan berdasarkan nilai R_{50} dari tabel *Percentage Depth Dose* (PDD) sesuai standar IAEA TRS-398. Setelah mendapatkan hasil nilai PDD, dilakukan pemanasan detektor melalui penyinaran berkas elektron, kemudian hasil pengukuran dicatat sebanyak lima kali pengulangan dengan variasi tegangan (+300 V, -300 V, +75 V) untuk setiap energi dan kedalaman yang berbeda (Dewang & Astuty, 2024). Pemilihan variasi tegangan mengacu pada CAT awal detektor *Advanced Markus* untuk kalibrasi berkas elektron berdasarkan referensi IAEA TRS-398 (International Atomic Energy Agency, 2024), selain itu perbedaan tegangan disesuaikan dengan tegangan kerja detektor berkas elektron, di mana $\pm 300V$ merupakan tegangan operasi utama, sedangkan +75 V dipilih sebagai tegangan rendah yang bernilai seperempat dari tegangan nominal. Penggunaan tegangan rendah ini bertujuan untuk menentukan faktor koreksi rekombinasi ion (k_s), sedangkan pembacaan pada tegangan positif dan negatif digunakan untuk menentukan faktor koreksi polaritas (k_{pol}), serta koreksi k_q berdasarkan nilai R_{50} pada Tabel 1. Sehingga, variasi tegangan ini memastikan detektor bekerja dalam kondisi optimum dan hasil pengukuran muatan listrik yang diperoleh memenuhi standar akurasi IAEA TRS-398.

Kemudian, nilai muatan listrik terkoreksi diperoleh dengan mengalikan hasil pengukuran muatan mentah dengan seluruh faktor koreksi yang telah ditentukan, meliputi faktor tekanan dan suhu, faktor rekombinasi ion, faktor polaritas, dan faktor k_q . Nilai muatan terkoreksi tersebut digunakan dalam perhitungan pada kedalaman referensi (Z_{ref}) untuk menentukan dosis serap referensi, kemudian dilakukan perhitungan dosis serap maksimum pada kedalaman maksimum (Z_{max}) untuk setiap variasi energi. Nilai deviasi dihitung dari selisih relatif antara dosis hasil pengukuran dengan nilai dosis acuan, yang menggambarkan tingkat kestabilan keluaran berkas elektron dari pesawat LINAC.

Tabel 1 Nilai k_q yang digunakan pada penelitian [IAEA 398]

Electron Beam Quality	PTW 34045
R (g/cm ²)	Advanced Markus
2,0	0,945
2,5	0,938
3,5	0,926
4,0	0,921
5,0	0,912
5,5	0,909
6,0	0,905
7,0	0,899
8,0	0,893

(sumber: International Atomic Energy Agency, 2024)

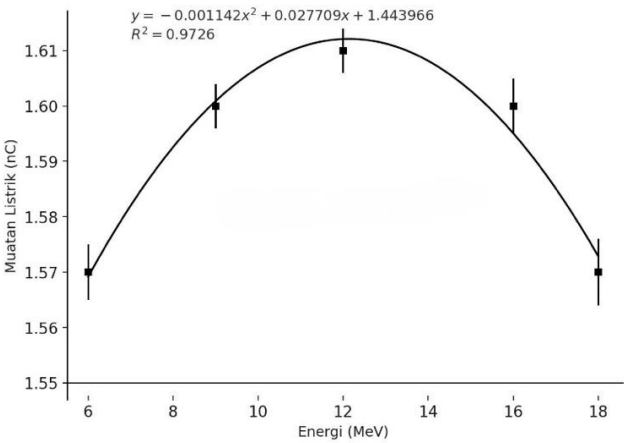
III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengukuran pada studi ini didapatkan dari rata-rata jumlah muatan listrik dengan 5 kali pengulangan. Pengukuran dilakukan dengan pemberian dosis penyinaran yang sama yaitu 200 MU dengan tegangan (+300V, +75V, -300V). Sehingga dari hasil pengukuran didapatkan nilai muatan listrik yang kemudian dilakukan perhitungan faktor koreksi seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Faktor koreksi berkas elektron

Faktor Koreksi	Energi				
	6 MeV	9 MeV	12 MeV	16 MeV	18 MeV
K _{TP}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
K _{elec}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
K _{pol}	1.0116	1.0109	1.0109	1.0107	1.0112
K _s	1.0032	1.0032	1.0037	1.0034	1.0032
K _{Q,Q0}	0.9391	0.9242	0.9114	0.9005	0.8950

Variasi dari lima energi dengan kedalaman detektor yang berbeda untuk tiap energi yaitu 6 MeV kedalaman 1.35 cm, 9 MeV kedalaman 2.11 cm, 12 MeV kedalaman 2.96 cm, 16 MeV kedalaman 3.95 cm, dan 18 MeV kedalaman 4.50 cm. Diperoleh nilai hasil pengukuran hubungan energi dan muatan listrik pada Gambar 2.



Gambar 2 Hubungan energi (MeV) dengan muatan listrik (nC) berkas elektron

Berdasarkan Gambar 2 menunjukkan hasil analisis regresi kuadratik antara energi berkas elektron dan muatan listrik yang ditampilkan pada Gambar, diperoleh persamaan hubungan $y = -0.00114x^2 + 0.02774x + 1.44387$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.97286$. Nilai ini menunjukkan adanya hubungan yang sangat kuat antara peningkatan energi dan perubahan muatan listrik, di mana sekitar 97% variasi muatan dapat dijelaskan oleh perubahan energi. Kurva menunjukkan pola non-linear, dengan muatan meningkat seiring kenaikan energi hingga mencapai nilai maksimum sekitar 1,61 nC pada energi 12 MeV, kemudian menurun pada energi yang lebih tinggi. Pola ini mengindikasikan bahwa proses ionisasi mencapai efisiensi maksimum pada energi menengah sebelum

menurun akibat efek penyerapan dan hamburan sekunder pada energi tinggi. Variasi muatan listrik yang relatif kecil (sekitar $\pm 2\%$) menunjukkan bahwa sistem kalibrasi LINAC bekerja dengan sangat stabil, sehingga perubahan energi tidak menyebabkan perbedaan signifikan terhadap dosis keluaran. Karena muatan yang terukur berbanding lurus dengan dosis yang dihantarkan, kestabilan nilai muatan ini menandakan bahwa rasio antara Monitor Unit (MU) dan dosis (cGy) tetap konstan. Dengan demikian, hasil penelitian ini membuktikan bahwa kesetaraan 1 MU = 1 cGy tetap terjaga di seluruh rentang energi elektron yang diuji, sesuai dengan kriteria akurasi dosis yang direkomendasikan oleh protokol IAEA TRS-398.

Nilai muatan listrik mencapai puncak pada energi 12 MeV kemudian menurun pada energi yang lebih tinggi. Peningkatan nilai muatan listrik ini menunjukkan bahwa berkas radiasi masih memiliki energi yang cukup besar untuk menghasilkan ionisasi di dalam medium hingga mencapai titik maksimum atau *depth of maximum dose* (d_{max}). Setelah melewati titik tersebut, nilai muatan mulai menurun karena energi radiasi semakin berkurang akibat penyerapan dan hamburan dalam air (Setiawan & Timotius Manik, 2024). Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin dalam posisi detektor, semakin kecil intensitas radiasi yang diterima, sehingga muatan listrik yang terbaca juga semakin rendah. Pola ini sesuai dengan karakteristik umum kurva *percentage depth dose* (PDD) pada pengukuran berkas elektron LINAC (Anggarini et al., 2019), di mana dosis maksimum dicapai pada kedalaman tertentu sebelum menurun secara eksponensial karena efek atenuasi dan kehilangan energi dalam medium.

Pada hasil pengukuran energi 16 MeV dan 18 MeV, terlihat bahwa nilai muatan listrik justru lebih rendah dibandingkan energi 12 MeV. Hal ini disebabkan oleh kedalaman detektor semakin meningkat seiring bertambahnya energi dan karakteristik berkas elektron berenergi tinggi yang memiliki daya penetrasi lebih besar, sehingga sebagian besar energinya terbawa lebih dalam dan tidak seluruhnya terserap pada kedalaman pengukuran. Selain itu, elektron berenergi tinggi juga mengalami hamburan lateral yang lebih luas sehingga distribusi dosis menjadi lebih menyebar, menyebabkan jumlah ionisasi di sekitar detektor berkurang. Akibatnya, nilai muatan listrik yang terukur menjadi lebih kecil. Hasil ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Monicasari et al., 2023 yang menjelaskan bahwa peningkatan energi elektron menghasilkan pergeseran d_{max} ke kedalaman yang lebih dalam namun disertai dengan penurunan nilai relatif pada dosis dangkal (Monicasari et al., 2023). Dengan demikian, peningkatan energi tidak selalu diikuti oleh kenaikan muatan listrik, melainkan sangat bergantung pada distribusi energi berkas, posisi kedalaman pengukuran, serta karakteristik interaksi radiasi di dalam medium *water phantom* (Gazis et al., 2024). Untuk mengetahui tingkat kestabilan keluaran berkas elektron setiap energi, digunakan perhitungan deviasi anatar nilai pengukuran terhadap nilai referensi. Besarnya deviasi dapat ditentukan menggunakan Persamaan 1 (International Atomic Energy Agency, 2024) berikut:

$$deviasi = \frac{D_{W,Q}(Z_{max}) - D_{TPS}}{D_{TPS}} \times 100\% \quad (1)$$

Tabel 3 Nilai Deviasi (%) keluaran berkas elektron untuk tiap energi (MeV)

Energi (MeV)	M_q	Kedalaman Referensi (Z_{ref}) (mGy)	Kedalaman Maksimum (Z_{max}) (mGy)	Deviasi (%)
6	1.57	1999	1999	-0.050
9	1.60	2000	2000	-0.010
12	1.61	1992	1998	-0.121
16	1.60	1955	1997	-0.150
18	1.57	1906	1999	-0.067

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa perubahan energi pada pesawat LINAC berpengaruh terhadap kestabilan daya keluaran berkas elektron. Nilai deviasi yang diperoleh tidak membentuk pola yang linier, melainkan berfluktuasi seiring meningkatnya energi. Pada energi rendah (6 dan 9 MeV), deviasi terpantau kecil, kemudian menurun hingga sekitar $-0,15\%$ pada energi 16 MeV, dan kembali meningkat pada energi 18 MeV. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan energi tidak selalu berbanding lurus dengan kestabilan keluaran LINAC. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh perubahan efisiensi sistem akselerasi elektron dan kestabilan sumber *Radio Frequency* (RF) yang menghasilkan berkas

elektron. Menurut studi (Tan et al., 2025) menyatakan bahwa pada pesawat LINAC arus elektron dan tegangan memiliki pengaruh besar terhadap intensitas dan kestabilan berkas keluaran. Perubahan kecil pada sistem RF dapat menyebabkan distribusi arus elektron menjadi tidak merata, sehingga memengaruhi kestabilan keluaran berkas elektron. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa perubahan nilai deviasi energi kemungkinan besar disebabkan oleh variasi efisiensi akselerasi elektron dan kestabilan sumber RF pada LINAC.

Pada energi 9 MeV diperoleh nilai deviasi paling rendah ($-0,010\%$) meskipun kedalaman referensi dan kedalaman maksimum terukur paling tinggi di antara seluruh variasi energi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem LINAC beroperasi paling stabil pada rentang energi tersebut. Secara fisik, pada 9 MeV berkas elektron memiliki daya tembus yang lebih besar dibandingkan energi 6 MeV (Vadila & Milvita, 2018), tetapi masih berada dalam rentang efisiensi optimum dari sistem akselerator. Efisiensi penyaluran energi dari sistem RF ke berkas elektron pada energi ini lebih baik sehingga fluktuasi keluaran minimal. Pada energi 9 MeV variasi intensitas berkas elektron relatif kecil setelah optimasi parameter akselerator, menandakan kestabilan keluaran yang tinggi. Variasi keluaran pada energi 9 MeV berada dalam batas toleransi yang sangat kecil dibandingkan energi lainnya (Moeckli et al., 2021).

Meskipun nilai muatan terukur (M_Q) pada 9 MeV dan 16 MeV sama, yaitu 1,60 nC, perbedaan deviasi yang signifikan menunjukkan bahwa kestabilan keluaran tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya muatan, tetapi juga oleh homogenitas distribusi arus elektron, efisiensi konversi energi dalam medan akselerator (Santoso et al, 2020), serta faktor lingkungan seperti suhu dan tekanan saat pengukuran (Vadila & Milvita, 2018). Pada energi yang lebih tinggi, seperti 16 MeV, peningkatan tegangan percepatan dapat menyebabkan ketidakmerataan arus elektron dan fluktuasi kecil pada intensitas berkas, sehingga deviasi menjadi lebih besar ($-0,150\%$). Pada energi rendah, proses akselerasi elektron masih stabil karena osilasi gelombang mikro lebih mudah dikendalikan. Namun, pada energi menengah meningkatnya kebutuhan daya RF dapat menimbulkan fluktuasi arus elektron sehingga intensitas berkas menjadi tidak seragam, yang berakibat pada peningkatan deviasi negatif. Ketika energi mencapai nilai yang lebih tinggi sistem *feedback control* bekerja untuk menstabilkan amplitudo dan frekuensi RF, sehingga keluaran kembali mendekati nilai ideal. Hasil serupa ditemukan pada studi (Monicasari et al., 2023) yang menyatakan bahwa fluktuasi deviasi sering kali disebabkan oleh perubahan suhu internal komponen akselerator serta distribusi dosis yang tidak homogeny.

Nilai deviasi yang diperoleh pada penelitian ini masih berada dalam batas toleransi $\pm 2\%$ sesuai standar (International Atomic Energy Agency, 2024). Hal ini menandakan bahwa meskipun terdapat penyimpangan nilai deviasi antar energi, sistem LINAC tetap bekerja dengan tingkat kestabilan yang baik dan dapat digunakan secara aman dalam terapi radiasi. Dengan demikian, pola pada grafik dapat diinterpretasikan sebagai mekanisme penyesuaian sistem terhadap variasi energi untuk mempertahankan kestabilan output serta akurasi pengukuran dosis yang dihasilkan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh bahwa hubungan antara energi dan muatan listrik menunjukkan pola peningkatan hingga mencapai titik maksimum pada energi 12 MeV dengan nilai muatan tertinggi sebesar 1,61 nC, kemudian mengalami penurunan pada energi 16 MeV dan 18 MeV akibat adanya proses penyerapan dan hamburan radiasi dalam medium air. Analisis regresi kuadratik menghasilkan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,97286$, yang menunjukkan adanya hubungan yang sangat kuat antara energi dan muatan listrik. Sedangkan hasil analisis hubungan antara deviasi terhadap energi menunjukkan bahwa nilai deviasi minimum terjadi pada energi 9 MeV sebesar $-0,010\%$, menandakan kondisi paling stabil dari keluaran LINAC. Nilai deviasi tertinggi yang diperoleh sebesar $-0,15\%$ masih berada dalam batas toleransi $\pm 2\%$ sesuai standar IAEA TRS-398, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem LINAC beroperasi secara stabil dan konsisten terhadap variasi energi yang digunakan. Dengan demikian, proses kalibrasi dan pengendalian kualitas yang diterapkan telah sesuai dengan standar internasional IAEA, dan hasil penelitian ini membuktikan bahwa kesetaraan $1 \text{ MU} = 1 \text{ cGy}$ tetap terjaga di seluruh rentang energi elektron yang diuji.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tidak ada.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggarini, R., Muslim, M., & Mutanto, A. (2019). Analisis Sebaran Radiasi Hambur Di Sekitar Pesawat Sinar-X Pada Pemeriksaan Tomografi Ginjal. *Jurnal Ilmiah Giga*, 17(2), 63. <https://doi.org/10.47313/jig.v17i2.540>
- Dewang, S., & Astuty, S. D. (2024). *Komparasi Dosis Keluaran Berkas Foton dan Berkas Elektron Pada Pesawat Linear Accelerator Varian True Beam Terhadap Water Phantom*. 27(2).
- Firmansyah, O. A., Firmansyah, A. F., Sunaryati, S. I., Putri, M. M., Setiadi, A. R., Akbar, O. A., Arif, V., & Amelia, C. (2021). Implementation of Beam Matching Concept for the New Installed Elekta Precise Treatment System Medical LINACs in Indonesia. *Atom Indonesia*, 47(3), 181. <https://doi.org/10.17146/aij.2021.1041>
- Gazis, N., Bignami, A., Trachanas, E., Moniaki, M., Gazis, E., Bandekas, D., & Vordos, N. (2024). Simulation Dosimetry Studies for FLASH Radiation Therapy (RT) with Ultra-High Dose Rate (UHDR) Electron Beam. *Quantum Beam Science*, 8(2), 13. <https://doi.org/10.3390/qubs8020013>
- Guritna, E., Maslebu, G., Wibowo, N. A., & Hidayatullah, M. (2017). *Analisis Electron Beam Profile Constancy pada Pesawat Linac*.
- Hasanah, H., Qomariyah, N., Makmur, I. W. A., & Subroto, R. (2020). *Analisa Kurva PDD dan Dose Profile Berkas Elektron Pesawat Linac Varian Clinac CX*.
- International Atomic Energy Agency. (2024). *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy* (Rev. 1). INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. <https://doi.org/10.61092/iaea.ve7q-y94k>
- Khan, F. M., & Gibbons, J. P. (with Ovid Technologies, Inc). (2014). *Khan's the physics of radiation therapy* (5th edition). Lippincott Williams & Wilkins.
- Khiftiyah, M. (2014). *ANALISA KURVA PERCENTAGE DEPTH DOSE (PDD) DAN PROFILE DOSE UNTUK LAPANGAN RADIASI SIMETRI DAN ASIMETRI PADA LINEAR ACCELERATOR (LINAC) 6 DAN 10 MV*. 3(4).
- Kron, T., Haworth, A., & Williams, I. (2013). Dosimetry for audit and clinical trials: Challenges and requirements. *Journal of Physics: Conference Series*, 444, 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/444/1/012014>
- Li, Y., Wu, W., Yuan, W., Chai, L., Tang, F., He, R., Lu, Y., Zhang, Y., Lu, Y., Wang, L., Wang, M., Zhang, X., & Zhang, L. (2023). A method for selecting reference beam model of VMAT plans with three 6MV beam-matched linear accelerators during radiation oncology. *Scientific Reports*, 13(1), 10131. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36930-7>
- Moeckli, R., Jorge, P. G., Oesterle, R., & Cherbuin, N. (2021). *Commissioning of an ultra-high dose rate pulsed electron beam medical LINAC for FLASHRTpreclinical animal experiments and future clinical humanprotocols*. <https://doi.org/10.1002/mp.14885>
- Monicasari, N. P. P., Ratini, N. N., Sudarsana, I. W. B., Suryatika, I. B. M., Suardana, Ir. P., Widagda, I. G. A., Gunawan, A. A. N., & Irhas, R. (2023). Compliance Test of Percentage Depth Dose (PDD) Using LINAC Machine Brand Elekta Precise against American Association of Physicists in Medicine (AAPM) PDD with Electron Beam Energy Variation at Radiotherapy Installation

- RSUP Prof. Ngoerah in Denpasar. *Asian Journal of Medicine and Health*, 21(10), 226–232. <https://doi.org/10.9734/ajmah/2023/v21i10897>
- Puspitasari, R. A. (2020). Analisis Kualitas Berkas Radiasi LINAC Untuk Efektivitas Radioterapi. *Jurnal Biosains Pascasarjana*, 22(1), 11. <https://doi.org/10.20473/jbp.v22i1.2020.11-19>
- Setiawan, L., & Timotius Manik, J. (2024). Analisis Perbedaan Dosis Satu Dimensi Pada Berkas Foton 6 dan 10 MV Menggunakan Simulasi Monte Carlo Phits. *Blantika: Multidisciplinary Journal*, 2(8). <https://doi.org/10.57096/blantika.v2i8.192>
- Sutapa, G. N., I Wayan Suarya, Wayan Balik Sudarsana, Ida Bagus Made Suryatika, Made Sumadiyasa, & I Gusti Agung Widagda. (2024). Studi Dosis Radiasi Berkas Foton Energi 6 MV dan 10 MV Terhadap Nilai HI dan CI pada Kasus Kanker Serviks Menggunakan Teknik Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT): -. *Kappa Journal*, 8(3), 432–435. <https://doi.org/10.29408/kpj.v8i3.27385>
- Tan, Y., T Deoli, N., Harken, A. D., Brenner, D. J., & Garty, G. (2025). Beam intensity and stability control on a modified clinical linear accelerator for FLASH irradiation. 14 August 2025. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/adf8ac>
- Taprogge, J., Wadsley, J., Miles, E., & Flux, G. D. (2021). Recommendations for Multicentre Clinical Trials Involving Dosimetry for Molecular Radiotherapy. *Clinical Oncology*, 33(2), 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2020.12.002>
- Tsuneda, M., Abe, K., Fujita, Y., Morimoto, R., Hashimoto, T., Abe, Y., & Uno, T. (2023). Delivery accuracy of VMAT on two beam-matched linacs provided by accelerated go live service. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 24(7), e14071. <https://doi.org/10.1002/acm2.14071>
- Vadila, M., & Milvita, D. (2018). Analisis Keluaran Berkas Elektron Pesawat Terapi LINAC Tipe Varian CX 6264 di Rumah Sakit Universitas Andalas. *Jurnal Fisika Unand*, 7(2), 91–96. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.2.91-96.2018>