
Simulasi Pengaruh Kedalaman Tumor terhadap Distribusi Dosis Radiasi Menggunakan Model Atenuasi Eksponensial Berbasis Python

Cahyani Frahmawati ^{1, a} Kadek Ayu Cintya Adelia ^{1, b}

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

Jl. Yos Sudarso, Palangka Raya 74874, Indonesia

e-mail: ^a* frahmawaticahyani@gmail.com, ^b lidyakadekayu@gmail.com

Diajukan: 26 Juli 2026; Diterima: 5 Agustus 2026; Diterbitkan: 7 September 2026

Abstrak

Distribusi dosis radiasi merupakan faktor penting dalam perencanaan radioterapi karena menentukan keberhasilan penyampaian dosis terapeutik pada jaringan tumor sekaligus meminimalkan paparan terhadap jaringan sehat di sekitarnya. Salah satu faktor yang memengaruhi distribusi dosis adalah kedalaman tumor, yang berkaitan dengan proses atenuasi radiasi di dalam jaringan biologis. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi kedalaman tumor terhadap distribusi dosis radiasi menggunakan simulasi numerik berbasis Python. Simulasi dilakukan dengan menerapkan model atenuasi eksponensial untuk merepresentasikan penurunan dosis terhadap kedalaman jaringan serta fungsi Gaussian untuk menggambarkan puncak distribusi dosis pada lokasi tumor. Variasi kedalaman tumor yang dianalisis meliputi 1 cm, 3 cm, 5 cm, dan 10 cm pada rentang kedalaman jaringan 0–15 cm dengan koefisien atenuasi sebesar $0,15 \text{ cm}^{-1}$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman tumor menyebabkan puncak distribusi dosis bergeser ke arah jaringan yang lebih dalam disertai penurunan intensitas dosis akibat proses atenuasi. Dosis relatif maksimum menurun dari 1,66 pada kedalaman tumor 1 cm menjadi 1,02 pada kedalaman 10 cm, atau mengalami penurunan sebesar 38,55% dibandingkan kondisi acuan. Visualisasi distribusi dosis yang dihasilkan mampu menggambarkan hubungan antara kedalaman tumor dan karakteristik penyebaran dosis radiasi secara jelas. Penelitian ini menunjukkan bahwa model simulasi berbasis Python mampu merepresentasikan pengaruh kedalaman tumor terhadap distribusi dosis radiasi dan berpotensi dimanfaatkan sebagai media pembelajaran serta pendekatan awal dalam analisis dosimetri sebelum penerapan metode komputasi yang lebih kompleks.

Kata kunci: Radioterapi; Distribusi dosis radiasi; Kedalaman tumor ; Python; Atenuasi eksponensial

Abstract

Radiation dose distribution is a critical aspect of radiotherapy treatment planning, as it determines the effectiveness of delivering therapeutic doses to tumor tissues while minimizing radiation exposure to surrounding healthy tissues. One of the primary factors influencing dose distribution is tumor depth, which is closely associated with radiation attenuation within biological tissues. This study aimed to analyze the effect of tumor depth variation on radiation dose distribution using a Python-based numerical simulation. The simulation employed an exponential attenuation model to represent dose reduction with increasing tissue depth and a Gaussian function to describe the dose peak at the tumor location. Tumor depths of 1 cm, 3 cm, 5 cm, and 10 cm were simulated over a tissue depth range of 0–15 cm using a linear attenuation coefficient of 0.15 cm^{-1} . The simulation results showed that increasing tumor depth shifted the dose distribution peak toward deeper tissue regions while reducing the relative dose intensity due to radiation attenuation. The maximum relative dose decreased from 1.66 for a tumor depth of 1 cm to 1.02 for a tumor depth of 10 cm, corresponding to a 38.55% reduction relative to the reference condition. The resulting dose distribution profiles clearly illustrated the relationship between tumor depth and radiation dose characteristics. The findings demonstrate that the proposed Python-based simulation model is capable of representing the influence of tumor depth on radiation dose distribution and has the potential to serve as an educational tool and a preliminary approach for dosimetric analysis prior to the implementation of more advanced computational methods.

Keywords: Radiotherapy; Radiation dose distribution; Tumor depth; Python; Exponential attenuation

PENDAHULUAN

Kanker merupakan salah satu penyebab utama kematian di dunia dengan jumlah kasus yang terus mengalami peningkatan setiap tahunnya. Salah satu metode utama yang digunakan dalam penanganan kanker adalah radioterapi, yaitu terapi yang memanfaatkan radiasi pengion untuk merusak DNA sel kanker sehingga menghambat proses proliferasi dan memicu kematian sel. Keberhasilan radioterapi sangat ditentukan oleh ketepatan distribusi dosis radiasi pada volume target, sehingga jaringan tumor menerima dosis terapeutik yang optimal dengan paparan seminimal mungkin pada jaringan sehat di sekitarnya [1]. Oleh karena itu, analisis distribusi dosis radiasi menjadi aspek penting dalam perencanaan radioterapi karena berkaitan langsung dengan efektivitas terapi dan keselamatan pasien.

Distribusi dosis radiasi di dalam jaringan biologis dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti energi radiasi, karakteristik medium, geometri penyinaran, serta kedalaman tumor. Ketika radiasi memasuki jaringan biologis, intensitasnya akan mengalami penurunan akibat proses atenuasi yang melibatkan absorpsi dan hamburan [2]. Akibatnya, tumor yang berada pada kedalaman lebih besar memerlukan kemampuan penetrasi radiasi yang lebih tinggi agar dosis yang diterima tetap berada pada tingkat terapeutik [3]. Pemahaman mengenai hubungan antara kedalaman tumor dan distribusi dosis menjadi dasar dalam menentukan strategi penyinaran yang efektif pada proses radioterapi [4].

Perkembangan teknologi komputasi telah mendorong pemanfaatan simulasi numerik sebagai salah satu pendekatan dalam mempelajari distribusi dosis radiasi [5]. Simulasi memungkinkan analisis dilakukan tanpa melibatkan paparan radiasi secara langsung, sehingga lebih aman, efisien, dan ekonomis dibandingkan pengukuran eksperimental [6]. Dalam bidang fisika medis, simulasi distribusi dosis umumnya dilakukan menggunakan metode Monte Carlo yang dikenal memiliki tingkat akurasi tinggi karena mampu memodelkan interaksi partikel radiasi dengan medium secara stokastik. Meskipun demikian, penerapan metode Monte Carlo umumnya memerlukan perangkat lunak khusus, sumber daya komputasi yang besar, serta waktu komputasi yang relatif lama, sehingga kurang praktis untuk pembelajaran dasar maupun pengembangan model sederhana.

Berbagai penelitian telah memanfaatkan simulasi numerik dan perangkat lunak komputasi untuk mengevaluasi distribusi dosis radiasi pada radioterapi. Perangkat lunak dosimetri berbasis open-source telah dikembangkan untuk visualisasi dan analisis data [5] sementara pendekatan berbasis kecerdasan buatan dan simulasi komputasi menunjukkan kemampuan yang baik dalam memprediksi distribusi dosis [7]. Di sisi lain, Treatment Planning System (TPS) dan simulasi Monte Carlo masih menjadi standar dalam aplikasi klinis karena memiliki akurasi yang tinggi, meskipun memerlukan perangkat lunak khusus dan sumber daya komputasi yang besar [8]. Namun demikian, masih terbatas penelitian yang mengembangkan model simulasi sederhana berbasis Python sebagai media pembelajaran distribusi dosis radiasi dengan mengombinasikan model atenuasi eksponensial dan fungsi Gaussian. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan akan model numerik yang mudah direplikasi, efisien, dan tetap mampu merepresentasikan karakteristik dasar distribusi dosis radiasi sebagai sarana pembelajaran maupun analisis awal.

Penelitian ini mengembangkan simulasi distribusi dosis radiasi berbasis Python dengan memanfaatkan model atenuasi eksponensial dan fungsi Gaussian untuk memvisualisasikan distribusi dosis pada berbagai kedalaman tumor. Pendekatan ini dipilih karena Python merupakan perangkat lunak *open-source* yang memiliki kemampuan komputasi numerik dan visualisasi data melalui pustaka NumPy dan Matplotlib, sehingga model yang dikembangkan mudah direplikasi dan dikembangkan lebih lanjut. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif simulasi yang sederhana untuk menggambarkan hubungan antara kedalaman tumor dan distribusi dosis radiasi, sekaligus menjadi dasar bagi pengembangan model dosimetri yang lebih komprehensif pada penelitian selanjutnya. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan model simulasi distribusi dosis radiasi berbasis Python serta menganalisis pengaruh variasi kedalaman tumor terhadap distribusi dosis menggunakan model atenuasi eksponensial dan fungsi Gaussian.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model simulasi distribusi dosis radiasi berbasis Python yang mengombinasikan model atenuasi eksponensial dan fungsi Gaussian untuk merepresentasikan pengaruh variasi kedalaman tumor terhadap distribusi dosis. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada simulasi Monte Carlo atau Treatment Planning System (TPS), model yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang sebagai pendekatan numerik yang sederhana, mudah direplikasi, serta berpotensi dimanfaatkan sebagai media pembelajaran dan analisis awal dalam bidang fisika medis.

Variasi kedalaman tumor yang digunakan meliputi 1 cm, 3 cm, 5 cm, dan 10 cm untuk mengevaluasi perubahan pola distribusi dosis pada jaringan biologis. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model simulasi numerik yang sederhana, mudah direplikasi, dan memanfaatkan perangkat lunak *open-source* sebagai media pembelajaran konsep distribusi dosis radiasi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai hubungan antara kedalaman tumor, proses atenuasi radiasi, dan karakteristik distribusi dosis, serta menjadi dasar bagi pengembangan simulasi yang lebih kompleks pada penelitian selanjutnya.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan simulasi numerik untuk menganalisis pengaruh variasi kedalaman tumor terhadap distribusi dosis radiasi pada jaringan biologis. Pendekatan ini dipilih karena Python merupakan perangkat lunak open-source yang memiliki kemampuan komputasi numerik dan visualisasi data melalui pustaka NumPy dan Matplotlib sehingga banyak dimanfaatkan dalam scientific computing [9], [10]. Penelitian ini tidak menggunakan *Treatment Planning System* (TPS) maupun metode Monte Carlo, tetapi menerapkan model matematis berbasis atenuasi eksponensial sebagai pendekatan sederhana untuk menggambarkan distribusi dosis radiasi dalam medium biologis.

Parameter simulasi meliputi rentang kedalaman jaringan 0–15 cm didiskretisasi menjadi 500 titik data dengan interval yang seragam sebelum dilakukan perhitungan distribusi dosis. Koefisien atenuasi ditetapkan sebesar $0,15 \text{ cm}^{-1}$, sedangkan variasi kedalaman tumor yang dianalisis terdiri atas 1 cm, 3 cm, 5 cm, dan 10 cm. Distribusi dosis dasar dihitung menggunakan model atenuasi eksponensial

$$D(x) = D_{0e}^{\{-\mu x\}} \quad (1)$$

dengan:

$D(x)$ = dosis radiasi relatif pada kedalaman x .

D_0 = dosis awal (initial dose) pada permukaan jaringan. Pada penelitian ini dinormalisasi sebesar 1 (100%).

e = konstanta Euler ($\approx 2,71828$).

μ = koefisien atenuasi linier (linear attenuation coefficient) yang menunjukkan besarnya pelemahan intensitas radiasi dalam medium.

x = kedalaman jaringan yang dilalui radiasi (cm).

Tabel 1. Parameter Simulasi yang digunakan

Parameter	Nilai	Keterangan	Dasar Pemilihan
Kedalaman jaringan	0–15 cm	Domain simulasi	Disesuaikan dengan rentang simulasi
Jumlah titik data	500	Diskretisasi numerik	Agar kurva halus
Koefisien atenuasi (μ)	0,15 cm^{-1}	Pelemahan radiasi dalam medium	Nilai asumsi yang merepresentasikan atenuasi jaringan lunak berdasarkan literatur
Amplitudo Gaussian (A)	0,8	Peningkatan dosis pada lokasi tumor	Parameter asumsi untuk menghasilkan puncak distribusi yang jelas
Simpangan baku (σ)	0,5 cm	Lebar distribusi dosis	Parameter asumsi untuk merepresentasikan penyebaran dosis di sekitar target
Kedalaman tumor	1, 3, 5, 10 cm	Variasi posisi target	Variabel penelitian

Nilai parameter simulasi pada penelitian ini dipilih berdasarkan pendekatan sederhana yang umum digunakan dalam pemodelan numerik distribusi dosis. Koefisien atenuasi (μ) sebesar $0,15 \text{ cm}^{-1}$ digunakan sebagai nilai representatif untuk menggambarkan pelemahan radiasi pada jaringan biologis berdasarkan literatur mengenai atenuasi foton. Sementara itu, amplitudo Gaussian ($A = 0,8$) dan simpangan baku ($\sigma = 0,5 \text{ cm}$) ditetapkan sebagai parameter asumsi untuk menghasilkan puncak distribusi dosis yang terlokalisasi pada posisi tumor sehingga hubungan antara kedalaman tumor dan perubahan distribusi dosis dapat divisualisasikan dengan jelas.

Untuk merepresentasikan konsentrasi dosis pada lokasi tumor, model tersebut dikombinasikan dengan fungsi Gaussian sehingga distribusi dosis total dinyatakan sebagai

$$D_{total}(x) = D_{0e}^{\{-\mu x\}} + A \exp\left[-\frac{(x-x_t)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

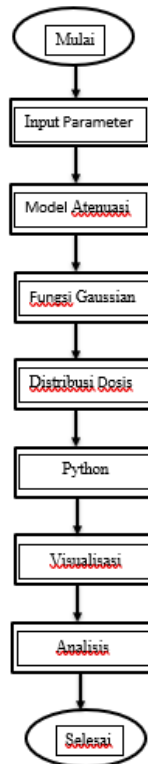
dengan:

$D_{total}(x)$ = distribusi dosis total pada kedalaman x .

A = amplitudo fungsi Gaussian yang menunjukkan besarnya peningkatan dosis pada lokasi tumor.

x_t = posisi atau kedalaman pusat tumor (cm), yaitu 1 cm, 3 cm, 5 cm, dan 10 cm.

σ = simpangan baku (standard deviation) fungsi Gaussian yang mengontrol lebar penyebaran dosis di sekitar tumor.
 $\exp(\cdot)$ = fungsi eksponensial yang membentuk kurva Gaussian.

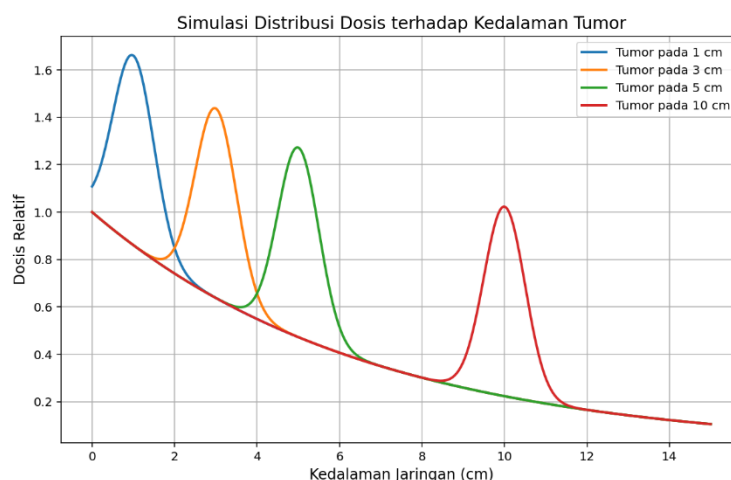


Gambar 1. Flowchart Metode

Prosedur simulasi diawali dengan penentuan parameter model, dilanjutkan dengan perhitungan distribusi dosis pada setiap variasi kedalaman tumor, kemudian dilakukan visualisasi kurva distribusi dosis menggunakan Matplotlib. Seluruh proses simulasi dilakukan untuk setiap kedalaman tumor sehingga diperoleh pola distribusi dosis yang dapat dibandingkan secara langsung. Analisis data dilakukan secara deskriptif-kuantitatif dengan mengamati perubahan posisi puncak distribusi dosis, kecenderungan penurunan dosis relatif akibat penambahan kedalaman jaringan, serta perubahan bentuk kurva distribusi dosis pada setiap variasi kedalaman tumor. Hasil simulasi selanjutnya diinterpretasikan berdasarkan konsep atenuasi radiasi dan dibandingkan dengan teori serta hasil penelitian terdahulu yang relevan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi numerik yang dikembangkan dalam penelitian ini menghasilkan distribusi dosis radiasi pada empat variasi kedalaman tumor, yaitu 1 cm, 3 cm, 5 cm, dan 10 cm. Distribusi dosis diperoleh melalui kombinasi model atenuasi eksponensial dan fungsi Gaussian yang merepresentasikan konsentrasi dosis pada lokasi tumor. Variasi kedalaman tersebut digunakan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik distribusi dosis seiring bertambahnya lintasan radiasi di dalam medium biologis.



Gambar 2. Distribusi Dosis Radiasi pada Variasi Kedalaman Tumor 1 cm, 3 cm, 5 cm, dan 10 cm.

Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa peningkatan kedalaman tumor menyebabkan terjadinya pergeseran puncak distribusi dosis ke arah jaringan yang lebih dalam. Pergeseran tersebut menunjukkan bahwa posisi maksimum dosis mengikuti lokasi tumor yang telah ditentukan pada proses simulasi. Fenomena ini mengindikasikan bahwa model matematis yang digunakan mampu merepresentasikan perubahan posisi target penyinaran sesuai dengan variasi kedalaman tumor yang dianalisis. Selain mengalami pergeseran posisi puncak dosis, distribusi dosis juga menunjukkan kecenderungan penurunan intensitas seiring bertambahnya kedalaman jaringan. Penurunan tersebut dipengaruhi oleh proses atenuasi radiasi yang menyebabkan energi radiasi semakin berkurang selama melewati medium biologis. Secara fisika, fenomena ini sesuai dengan hukum atenuasi eksponensial, di mana intensitas radiasi akan menurun secara eksponensial terhadap pertambahan lintasan dalam medium akibat proses absorpsi dan hamburan. Oleh karena itu, tumor yang terletak pada kedalaman lebih besar memerlukan penetrasi radiasi yang lebih tinggi agar dosis terapeutik tetap dapat dicapai.

Penurunan dosis relatif maksimum dari 1,66 pada kedalaman 1 cm menjadi 1,02 pada kedalaman 10 cm menunjukkan bahwa proses atenuasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi dosis radiasi. Semakin dalam posisi tumor, semakin panjang lintasan radiasi di dalam medium sehingga peluang terjadinya interaksi foton dengan jaringan meningkat. Akibatnya, intensitas radiasi yang mencapai target berkurang dan distribusi dosis bergeser mengikuti lokasi tumor dengan nilai puncak yang semakin rendah. Kondisi ini sesuai dengan karakteristik interaksi radiasi foton dalam jaringan biologis yang dijelaskan oleh hukum atenuasi eksponensial.

Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa tumor yang berada pada kedalaman 1 cm menghasilkan puncak distribusi dosis yang relatif dekat dengan permukaan jaringan. Sebaliknya, pada kedalaman 10 cm puncak distribusi bergeser lebih jauh ke dalam jaringan dengan intensitas dosis relatif yang lebih rendah dibandingkan kedalaman yang lebih dangkal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kedalaman tumor merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi karakteristik distribusi dosis radiasi, sehingga perlu dipertimbangkan dalam proses perencanaan radioterapi. Temuan penelitian ini sejalan dengan konsep dasar dosimetri radioterapi yang menyatakan bahwa distribusi dosis dipengaruhi oleh interaksi radiasi dengan medium yang dilaluinya. Semakin panjang lintasan radiasi di dalam jaringan, semakin besar peluang terjadinya absorpsi dan hamburan, sehingga intensitas radiasi yang mencapai target akan semakin berkurang. Hasil ini juga mendukung berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa kedalaman target merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi distribusi dosis pada proses radioterapi. Meskipun penelitian ini menggunakan pendekatan numerik yang lebih sederhana dibandingkan *Treatment Planning System* maupun simulasi Monte Carlo, pola distribusi dosis yang dihasilkan tetap mampu menggambarkan karakteristik dasar fenomena atenuasi radiasi dalam medium biologis.

Secara keseluruhan, Gambar 1 menunjukkan bahwa model simulasi berbasis Python yang dikembangkan mampu merepresentasikan hubungan antara kedalaman tumor dan distribusi dosis radiasi secara konsisten. Pola ini sejalan dengan hasil penelitian mengenai distribusi dosis pada *Treatment Planning System* (TPS) yang menunjukkan bahwa distribusi dosis dipengaruhi oleh karakteristik target dan teknik penyinaran [11]. Visualisasi tersebut

memberikan gambaran yang intuitif mengenai perubahan posisi puncak dosis serta penurunan intensitas radiasi akibat proses atenuasi, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai media pembelajaran maupun analisis awal sebelum dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak radioterapi yang lebih kompleks.

Untuk memberikan gambaran yang lebih terstruktur mengenai hasil simulasi, nilai posisi puncak dosis dan dosis relatif maksimum pada setiap variasi kedalaman tumor dirangkum dalam Tabel 1. Penyajian data ini bertujuan untuk mempermudah analisis kuantitatif terhadap pengaruh kedalaman tumor terhadap karakteristik distribusi dosis radiasi.

Tabel 2. Hasil Simulasi Distribusi Dosis Radiasi dan Penurunan Dosis pada Variasi Kedalaman Tumor

Kedalaman Tumor (cm)	Posisi Puncak Dosis (cm)	Dosis Relatif Maksimum	Penurunan Dosis terhadap 1 cm (%)	Persentase Dosis Tersisa (%)	Karakteristik Distribusi
1	0,96	1,66	0	100,00	Puncak distribusi berada dekat permukaan jaringan
3	2,98	1,44	13,25	86,14	Puncak distribusi bergeser menuju kedalaman menengah.
5	4,99	1,27	23,49	74,70	Distribusi dosis semakin dipengaruhi proses atenuasi.
10	9,98	1,02	38,55	61,45	Puncak distribusi berada pada kedalaman terbesar.

Berdasarkan Tabel 1, peningkatan kedalaman tumor menunjukkan adanya perubahan pada posisi puncak dosis serta dosis relatif maksimum yang dihasilkan oleh model simulasi. Posisi puncak dosis berada pada kisaran kedalaman yang mendekati lokasi tumor yang telah ditentukan, yaitu sekitar 0,96 cm, 2,98 cm, 4,99 cm, dan 9,98 cm untuk variasi kedalaman tumor 1 cm, 3 cm, 5 cm, dan 10 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model matematis yang digunakan mampu merepresentasikan lokasi target penyinaran dengan baik. Dari Tabel 1, dapat dilihat peningkatan kedalaman tumor menyebabkan penurunan dosis relatif maksimum secara bertahap. Persentase dosis yang tersisa berkurang dari 100% pada kedalaman 1 cm menjadi 61,45% pada kedalaman 10 cm, menunjukkan bahwa proses atenuasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi dosis radiasi di dalam jaringan.

Selain itu, dosis relatif maksimum mengalami penurunan seiring bertambahnya kedalaman tumor. Nilai dosis relatif maksimum menurun dari 1,66 pada kedalaman tumor 1 cm menjadi 1,02 pada kedalaman 10 cm. Berdasarkan hasil simulasi, penurunan dosis terhadap kondisi acuan (tumor 1 cm) mencapai 13,25% pada kedalaman 3 cm, 23,49% pada kedalaman 5 cm, dan 38,55% pada kedalaman 10 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin dalam posisi tumor, semakin besar pelemahan dosis yang terjadi akibat proses atenuasi selama radiasi merambat di dalam medium. Secara keseluruhan, hasil kuantitatif pada Tabel 1 mendukung visualisasi distribusi dosis yang telah ditunjukkan pada Gambar 1. Penyajian dalam bentuk tabel memberikan informasi numerik yang lebih mudah dibandingkan antarvariasi kedalaman tumor, sehingga perubahan karakteristik distribusi dosis dapat diamati secara lebih objektif. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan simulasi yang digunakan mampu menggambarkan hubungan antara kedalaman tumor dan distribusi dosis radiasi secara konsisten sesuai dengan parameter model yang diterapkan.

Hasil simulasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman tumor berpengaruh terhadap penurunan dosis relatif maksimum yang diterima target. Pola tersebut sejalan dengan konsep dasar fisika radiasi yang menyatakan bahwa intensitas radiasi akan berkurang secara eksponensial ketika melewati suatu medium akibat proses absorpsi dan hamburan. Oleh karena itu, semakin dalam posisi tumor, semakin besar pelemahan radiasi yang terjadi sebelum mencapai target, sehingga distribusi dosis yang dihasilkan menjadi lebih rendah dibandingkan pada tumor yang berada dekat permukaan.

Pola tersebut sejalan dengan hasil penelitian [12], yang menunjukkan bahwa distribusi dosis pada *Planning Target Volume* (PTV) dipengaruhi oleh kualitas perencanaan radioterapi dan karakteristik target sehingga parameter distribusi dosis seperti *Conformity Index* dan *Homogeneity Index* perlu diperhatikan. Hasil penelitian [13] juga menunjukkan bahwa distribusi dosis dipengaruhi oleh konfigurasi penyinaran dan kondisi target, sehingga perubahan karakteristik target akan memengaruhi distribusi dosis yang dihasilkan. Temuan pada penelitian ini memperlihatkan kecenderungan yang serupa, yaitu distribusi dosis berubah seiring bertambahnya kedalaman tumor akibat proses atenuasi radiasi.

Meskipun penelitian ini menggunakan model matematis berbasis Python yang lebih sederhana dibandingkan *Treatment Planning System* (TPS) maupun simulasi Monte Carlo, pola distribusi dosis yang dihasilkan tetap konsisten dengan konsep dasar dosimetri radioterapi. Hasil penelitian ini sejalan dengan [14], yang menunjukkan bahwa distribusi dosis radiasi berubah terhadap variasi kedalaman dan karakteristik penyinaran pada fantom menggunakan pesawat LINAC. Selain itu, [15] juga melaporkan bahwa kualitas distribusi dosis sangat dipengaruhi oleh proses perencanaan radioterapi dan evaluasi dosimetri menggunakan parameter seperti *Dose Volume Histogram* (DVH), *Conformity Index* (CI), dan *Homogeneity Index* (HI). Oleh karena itu, model yang dikembangkan pada penelitian ini berpotensi dimanfaatkan sebagai media pembelajaran maupun sebagai dasar pengembangan simulasi distribusi dosis pada penelitian selanjutnya. Meskipun model yang dikembangkan belum menggantikan fungsi *Treatment Planning System* (TPS) maupun simulasi *Monte Carlo*, hasil yang diperoleh telah mampu menggambarkan pengaruh kedalaman terhadap perubahan distribusi dosis secara konsisten [16]. Oleh karena itu, model ini berpotensi dimanfaatkan sebagai media pembelajaran dalam bidang fisika medis, khususnya untuk membantu memahami konsep dasar distribusi dosis radiasi serta sebagai tahap awal pengembangan model simulasi yang lebih kompleks pada penelitian selanjutnya. Perlu dicatat bahwa model yang digunakan dalam penelitian ini merupakan pendekatan numerik sederhana yang difokuskan pada visualisasi pengaruh kedalaman tumor terhadap distribusi dosis. Oleh karena itu, simulasi belum mengakomodasi heterogenitas jaringan biologis, efek hamburan sekunder, maupun parameter dosimetri klinis seperti variasi energi foton, ukuran lapangan radiasi, dan karakteristik berkas. Keterbatasan tersebut membuka peluang bagi penelitian selanjutnya untuk mengintegrasikan model fisika yang lebih kompleks sehingga akurasi simulasi dapat ditingkatkan dan lebih mendekati aplikasi klinis.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa model simulasi distribusi dosis radiasi berbasis Python mampu merepresentasikan pengaruh variasi kedalaman tumor terhadap karakteristik distribusi dosis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman tumor menyebabkan pergeseran puncak distribusi dosis ke arah jaringan yang lebih dalam disertai penurunan intensitas dosis akibat proses atenuasi. Secara kuantitatif, dosis relatif maksimum menurun dari 1,66 pada kedalaman tumor 1 cm menjadi 1,02 pada kedalaman 10 cm atau mengalami penurunan sebesar 38,55%. Temuan ini mengindikasikan bahwa model yang dikembangkan berpotensi dimanfaatkan sebagai media pembelajaran dan pendekatan awal dalam analisis dosimetri sebelum penerapan metode komputasi yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. D. Ramadiah *et al.*, “Perbandingan Daya Tangkap Dosis Radiasi Beberapa Dosimeter Aktif Perorangan,” *J. Fis. Unand*, vol. 13, no. 3, pp. 351–357, 2024, doi: <https://doi.org/10.25077/jfu.13.3.351-357.2024>.
- [2] W. Nurhidayat, D. Andriani, L. T. Yuhedi, and W. Diyana, “Profile of Cervical Cancer Management with Radiation and Chemoradiation Therapy at The Radiotherapy Installation of RSUP Dr. Mohammad Hoesin Palembang,” *Radioter. Onkol. Indones.*, vol. 15, no. 1, 2024, doi: 10.32532/jori.v15i1.165.
- [3] H. P. Sri Wulandari, Syarifatul Ulya, Fiqi Diyona, Rico Adrial, “THE COMPARISON OF SURFACE DOSE IN VIVO DOSIMETRY USING 3D-CRT AND IMRT,” *J. Profesi Med. J. Kedokt. dan Kesehat.*, vol. 18, no. 1, pp. 90–99, 2024, doi: <https://doi.org/10.33533/jpm.v18i1.7771>.
- [4] F. A. Rorong, I. M. L. Prasetya, and I. W. Juliasa, “Terapi Radiasi Eksternal dengan Metode Hypofractionated pada Kanker payudara Post Breast Conserving Surgery di Instalasi Onkologi Radiasi Rumah Sakit Indriati Solo Baru: Studi Kasus,” *J. Imejing Diagnostik*, vol. 11, no. 1, pp. 11–17, 2025, doi: 10.31983/jimed.v1i1.11878.
- [5] T. Pakarinen and J. Ojala, “Computer Methods and Programs in Biomedicine Profeel — An open source dosimetry data visualization and analysis software,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 212, p. 106457, 2021, doi: 10.1016/j.cmpb.2021.106457.
- [6] M. Chen, Z. Yang, Z. Wardak, S. Stojadinovic, X. Gu, and W. Lu, “Dose kernel decomposition for spot-based

- radiotherapy treatment planning,” *Med. Phys.*, vol. 49, no. 2, pp. 1196–1208, 2022, doi: 10.1002/mp.15415.Dose.
- [7] P. Kummanee, W. Chanchaoen, K. Tangtisanon, and T. Fuangrod, “Predicting Three-Dimensional Dose Distribution of Prostate Volumetric Modulated Arc Therapy Using Deep Learning,” *life*, vol. 13, no. 05, pp. 1–15, 2021, doi: 10.3390/life11121305.
- [8] N. Benzazon, J. Colnot, D. Kermenguy, S. Achkar, and F. De Vathaire, “Analytical models for external photon beam radiotherapy out-of- fi eld dose calculation : a scoping review,” *Front. Oncol.*, vol. 13, no. May, pp. 1–13, 2023, doi: 10.3389/fonc.2023.1197079.
- [9] C. R. Harris *et al.*, “Array programming with NumPy,” *Nature*, vol. 585, no. September, pp. 357–362, 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [10] P. Virtanen *et al.*, “SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python,” *Nat. Res.*, vol. 17, no. March, pp. 261–272, 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [11] M. I. Anggi Effina, Dian Milvita, “DISTRIBUSI DOSIS RADIASI FOTON PADA TREATMENT PLANNING SYSTEM MENGGUNAKAN TEKNIK 3DCRT DAN IMRT UNTUK TERAPI KANKER SERVIKS,” *J. Fis. Unand*, vol. 11, no. 1, pp. 126–130, 2022, doi: <https://doi.org/10.25077/jfu.11.1.126-130.2022>.
- [12] M. I. S *et al.*, “Analisis Perencanaan Radioterapi Menggunakan Teknik Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT) pada Pasien Kanker Serviks,” *J. Fis. Unand*, vol. 12, no. 1, pp. 165–171, 2023, doi: <https://doi.org/10.25077/jfu.12.1.165-171.2023>.
- [13] R. Elvira *et al.*, “Analisis Perencanaan Radioterapi Pasien Kanker Nasofaring Menggunakan Teknik Intensity Modulated Radiotherapy,” *J. Fis. Unand*, vol. 10, no. 3, pp. 337–343, 2021, doi: <https://doi.org/10.25077/jfu.10.3.337-343.2021>.
- [14] I. Wulandari, M. A. Shafii, R. Adrial, and F. Diyona, “Distribusi Dosis Radiasi Foton Berdasarkan Kedalaman dan Luas Lapangan Penyinaran Pada Fantom Menggunakan Pesawat Linac Tipe Clinac CX,” *J. Fis. Unand*, vol. 11, no. 1, pp. 89–96, 2022, doi: <https://doi.org/10.25077/jfu.11.1.89-96.2022>.
- [15] D. Syafna *et al.*, “Perbandingan Dosimetri Perencanaan Radioterapi IMRT Menggunakan Fasilitas Beam Angle Optimization dan Teknik Manual Pada Kasus Kanker Nasofaring Stadium III,” *J. Fis. Unand*, vol. 13, no. 1, pp. 170–176, 2024, doi: <https://doi.org/10.25077/jfu.13.1.170-176.2024>.
- [16] T. C. Zhu *et al.*, “Report of AAPM Task Group 219 on independent calculation- based dose / MU verification for IMRT,” *Med. Phys.*, vol. 48, no. 10, pp. 1–22, 2021, doi: 10.1002/mp.15069.