JURNAL PENELITIAN SAINS
Journal Home Page: http://ejurnal.mipa.unsri.ac.id/index.php/jps/index

Studi penentuan koefisien atenuasi sumber ^{177}Lu menggunakan *software* PHITS untuk aplikasi bidang kedokteran nuklir

MARTINUS RANDI TURU[1], OKKY AGASSY FIRMANSYAH[2], NUR RAHMAH HIDAYATI[2], AKMAL JOHAN[1], TYAS AL ARANDI[1], DAN RAMLAN[1]*

[1]Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan 30862, Indonesia; [2]ORTN PRTKMMN-BRIN, Jl. Lebak Bulus Raya, Kec. Cilandak, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 12440

Kata kunci:
^{177}Lu,
koefisien atenuasi,
PMMA,
interaksi radiasi dan materi,
distribusi dosis,
PHITS

ABSTRAK: Radionuklida ^{177}Lu, memiliki peran penting dalam kedokteran nuklir khususnya sebagai spesialis dalam radioterapi, berkat paruh yang relatif panjang dan pancaran radiasi yang efektif untuk jaringan lunak. Salah satu pendekatan untuk melindungi manusia dan lingkungan dari radiasi adalah dengan memahami studi atenuasi sumber radioaktif, yang mengacu pada pengurangan intensitas radiasi saat melewati medium, seperti bahan fantom. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai koefisien atenuasi dari sumber ^{177}Lu menggunakan slab fantom PMMA (*Polymethyl Methacrylate*) dengan menggunakan perangkat lunak PHITS yang berbasis simulasi Monte Carlo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas sumber radiasi ^{177}Lu secara signifikan memengaruhi nilai atenuasi, nilai atenuasi (μ) yang didapatkan sebesar 0,0327 cm^{-1} hingga 0,0332 cm^{-1}. Selain itu, interaksi radiasi ^{177}Lu dengan material PMMA pada energi menengah hingga tinggi didominasi oleh efek fotolistrik dan hamburan Compton. Semakin tebal bahan yang digunakan, semakin kecil intensitas radiasi yang tersisa setelah proses atenuasi, karena lebih banyak foton yang diserap atau dihamburkan, sehingga semakin sedikit pula energi foton yang mencapai area target membuat distribusi dosis yang dihasilkan menjadi lebih kecil.

Keywords:
^{177}Lu,
attenuation coeficient,
PMMA,
radiation interaction and material,
dose distribution,
PHITS

ABSTRACT: The radionuclide ^{177}Lu plays an important role in nuclear medicine, particularly as a specialist in radiotherapy, due to its relatively long half-life and effective radiation emission for soft tissues. One approach to protecting humans and the environment from radiation is by understanding the attenuation study of radioactive sources, which refers to the reduction of radiation intensity as it passes through a medium, such as phantom materials. This study aims to determine the attenuation coefficient of the ^{177}Lu source using a PMMA (Polymethyl Methacrylate) slab phantom with the PHITS software based on Monte Carlo simulations. The results show that an increase in the activity of the ^{177}Lu radiation source significantly affects the attenuation value, with attenuation coefficients (μ) ranging from 0.0327 cm^{-1} to 0.0332 cm^{-1}. Additionally, the interaction of ^{177}Lu radiation with PMMA material at medium to high energies is dominated by the photoelectric effect and Compton scattering. The thicker the material used, the smaller the radiation intensity remaining after the attenuation process, because more photons are absorbed or scattered, so less photon energy reaches the target area, making the resulting dose distribution smaller.

1 PENDAHULUAN

Radionuklida merupakan inti atom yang tidak memiliki kesatabilan dan materi yang mengandung radionuklida dikenal sebagai bahan atau zat radioaktif [1]. Komposisi jumlah proton dan neutron dalam inti akan mempengaruhi kestabilannya [2]. Untuk mencapai kestabilan, maka bahan radioaktif tersebut akan meluruh dengan mengemisikan sinar radioaktif [3]. Saat ini bahan radioaktif dikembangkan secara pesat pada sektor kesehatan terutama dalam kedokteran nuklir. Berkembangnya penggunaan bahan radioaktif termasuk kelompok lantanida, ion-ion yang terbentuk dapat berikatan dengan lebih banyak ion lain, dan sifat hubungannya dengan mekanisme pertahanan tubuh adalah bagian keuntungan dari golongan lantanida. Dalam hal ini ada salah satu bahan radiolantanida yang kemudian banyak untuk digunakan dalam kedokteran nuklir yakni lutesium-177 (^{177}Lu). Penyebabnya karena ^{177}Lu mempunyai umur paruh yang relatif panjang sebesar 6,71 hari yang dipakai untuk an-

* **Corresponding Author:** ramlan@unsri.ac.id

https://doi.org/10.56064/jps.v27i1.1166
Naskah diusulkan: 12 Februari 2024; disetujui: 15 Maret 2025; diterbitkan: 30 April 2025
p-ISSN: 1410-7058 e-ISSN: 2597-7059 © 2025 JPS MIPA UNSRI

tisipasi terhadap masalah waktu saat menyimpan dan mendistribusikannya sejak dari pembutan hingga saat digunakan, pancaran radiasi β yang rendah sebesar 497 keV (78,6%) dan 176 keV (12,2%) yang cukup baik untuk jaringan lunak dengan ukuran kecil, serta pancaran radiasi γ sebesar 113 keV (6,4%) dan 208 keV(11%) untuk yang lebih dari jaringan lunak. Faktor faktor ini yang kemudian menjadi pertimbangan untuk menggunakan ^{177}Lu sebagai bahan dalam kebutuhan medis terutama di negara-negara berkembang [4,5,6].

Meningkatnya kebutuhan akan penggunaan radioaktif untuk aplikasi nuklir, kemungkinan paparan terhadap radiasi pengion juga akan semakin tinggi terutama bagi orang-orang yang tidak berkerja secara langsung dengan radiasi. Banyaknya orang menggunakan radiasi pengion, sehingga mendorong percepatan studi tentang perlindungan radiasi [7]. Berdasarkan peraturan BAPETEN No. 4 Tahun 2013 [8], keselamatan radiasi adalah upaya untuk melindungi pekerja, masyarakat, dan lingkungan hidup dari bahaya radiasi. Konsep ini juga berkaitan dengan pemahaman tentang studi atenuasi sumber radioaktif yang merupakan proses mengurangi intensitas radiasi dari sumber radioaktif sebelum mencapai manusia dan lingkungan. Prinsip dasar penahan radiasi adalah mengurangi intensitas radiasi dengan memanfaatkan interaksi antara radiasi dengan medium (material), yang mengubah energi radiasi menjadi energi panas [9].

Untuk meninjau penahan radiasi membutuhkan sebuah medium yang dalam hal ini material yang digunakan berupa fantom. Salah satu jenis fantom yang sering digunakan adalah slab fantom berbahan *polymethyl methacrylate* (PMMA). Fantom jenis ini dibentuk bahan plastik transparan yang memiliki sifat yang mirip dengan jaringan lunak manusia, seperti kepadatan dan kejernihan optik dengan massa jenis yang dimiliki oleh PMMA adalah 0,994 gr/cm3 yang hampir setara dengan air [10,11,12]. Keuntungan penggunaan fantom berbahan PMMA seperti kemampuannya untuk mensimulasikan jaringan manusia dengan baik dan memberikan respons yang konsisten terhadap radiasi, serta seperti densistas yang rendah, biaya yang ekonomis, dan kemudahan dalam proses pengolahan [13]. Dalam penelitian oleh Mourão et al., (2014) [14], dilakukan investigasi terhadap dosis yang terdeposisi pada sebuah fantom berbentuk silinder berbahan *polymethyl methacrylate* (PMMA). Hasil-hasil yang diperoleh memberikan kontribusi dalam penyebaran prosedur yang tepat serta dalam mengoptimalkan dosimetri dan pengujian kontrol kualitas.

Secara keseluruhan, penelitian tentang penentuan faktor atenuasi sumber ^{177}Lu ini akan dilakukan dengan pendekatan simulasi Monte Carlo yang memanfaatkan *software* PHITS. PHITS (*Particle and Heavy Ion Transport Code System*) merupakan sistem perangkat yang yang melakukan perhitungan transpor partikel berdasarkan metode Monte Carlo [15]. PHITS dimanfaatkan karena efektif dalam memodelkan interaksi partikel dengan materi (media) dan dapat memberikan estimasi yang akurat tentang faktor atenuasi. Dengan pengetahuan yang akurat tentang faktor atenuasi, pengiriman dosis radiasi dapat dioptimalkan, efektivitas dapat ditingkatkan, dan risiko efek samping dapat dikurangi.

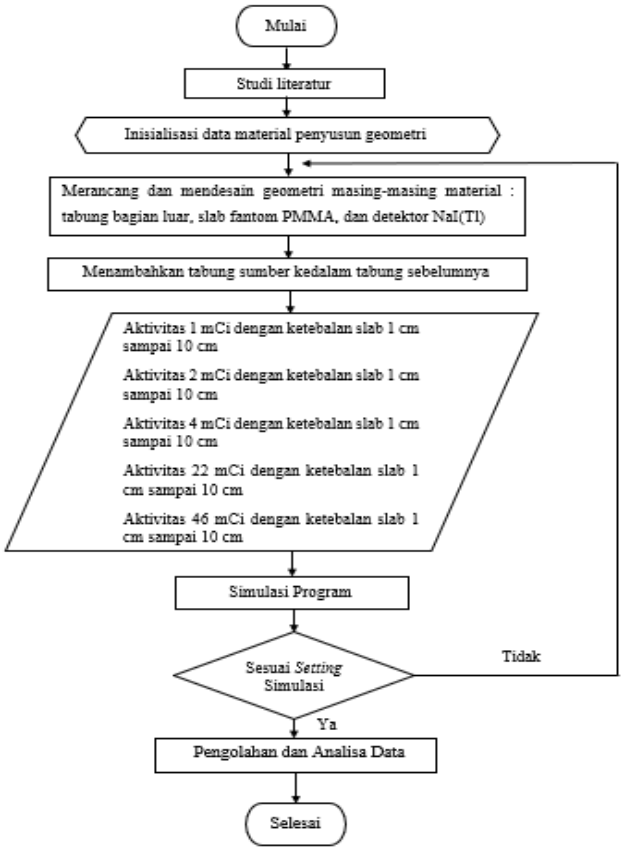
2 BAHAN DAN METODA

Waktu dan tempat

Penelitian ini berlangsung pada bulan September 2023 hingga Juli 2024 di ORTN PRTKMMN-BRIN, Jl. Lebak Bulus Raya No.49, RT.3/RW.2, Lb.Bulus, Kec. Cilandak, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 12440 dan Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

Prosedur Penelitian

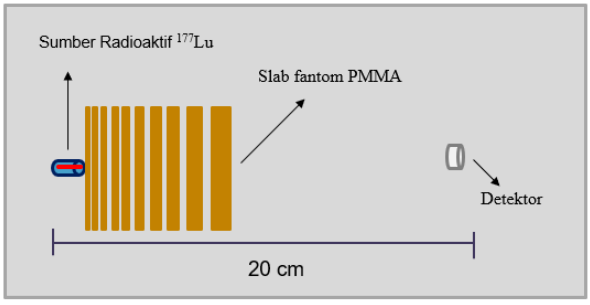
Pada penelitian ini, untuk dapat menghasilkan nilai atenuasi dari sumber radioaktif ^{177}Lu, maka simulasi didukung dengan menggunakan perangkat keras seperti Laptop dan PC dan perangkat lunak berupa *software* PHITS, Microsoft Excel digunakan untuk mengolah data dari *output* PHITS. Alur penelitian dilakukan seperti dalam Gambar 1., dimulai dari studi literatur, setelah itu dilanjutkan mencari sumber bahan penyusun dari geometri tampak dalam Tabel 1. selanjutnya merancang dan mendesain geometri masing-masing material, lalu meng*input*kan variasi aktivitas (1 mCi, 2 mCi, 4 mCi, 22 mCi, dan 46 mCi) dan variasi ketebalan 1 cm hingga 10 cm [16]. Kemudian, program dijalankan (*running*), apabila hasilnya sesuai, maka selanjutnya akan akan diolah dan dianalisis. Simulasi dilakukan dengan membuat jarak antara tabung sumber ^{177}Lu dengan detektor NaI(Tl) sepanjang 20 cm. Slab fantom dengan ukuran 30 cm x 30 cm yang posisi permukaanya menempel pada permukaan tabung sumber ^{177}Lu diletakkan ditengah antara tabung sumber dan detektor NaI(Tl). Untuk ketebalan slab fantom bervariasi dari 1 cm hingga 10 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

***T*abel 1.** Material Penyusun Dimensi Geometri [17]

Material	Density (g/cm³)	Element	Kode	Fraksi berat %
Polypropylene (*plastic*) (C_3H_6)	0.9	H	1000	-0.143724
		C	6000	-0.856276
Tabung sumber (*air dry*) (CNOAr)	0.001205	C	6000	-0.000124
		N	7000	-0.755268
		O	8000	-0.231781
		Ar	18000	-0.012827
PMMA (Lucite) ($C_5O_2H_8$)	1.19	H	1000	-0.080545
		C	6000	-0.599836
		O	8000	-0.319619
Detektor (Sodium iodide, thalium doped) (NaI(Tl))	3.67	Na	11000	-0.500000
		I	53000	-0.500000



Gambar 2. *Setting* Simulasi pada PHITS

Analisis Data

Analisis yang digunakan dalam penelitian ini merupakan analisis yang berbasis pendekatan simulasi komputer menggunakan kode Monte Carlo pada perangkat lunak *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS). Simulasi Monte Carlo mengacu pada serangkaian metode pengambilan sampel statistik yang digunakan untuk memperkirakan pemecahan masalah kuantitatif. Metode Monte Carlo merupakan salah satu metode numerik untuk mensimulasikan proses stokastik yang didasarkan pada sampling bilangan random. Dalam penelitian ini agar dapat menghasilkan nilai atenuasi yang bersumber dari bahan radioaktif ^{177}Lu, mengetahui interaksi yang terjadi antara radiasi dengan materi, dan mendapatkan nilai disribusi dosis melalui serangkaian simulasi.

3 HASIL

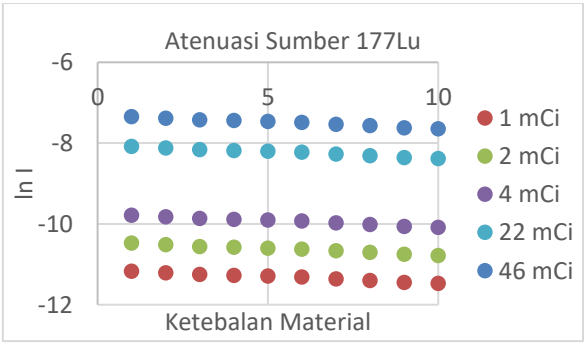
Analisis Koefisien Atenuasi Sumber ^{177}Lu

Dari proses simulasi menentukan nilai koefisien atenuasi sumber ^{177}Lu, didapatkan hasil yang dimuat dalam bentuk Tabel 2. berikut.

Tabel 2. Hasil Nilai Koefisien Atenuasi Sumber ^{177}Lu dengan Variasi Aktivitas 1 mCi, 2 mCi, 4 mCi, 22 mCi, 46 mCi dan ketebalan medium 1 cm sampai 10 cm

Sumber	Aktivitas (mCi)	Koefisien atenuasi (cm^{-1})
^{177}Lu	1	0,0327
	2	0,0328
	4	0,0331
	22	0,0331
	46	0,0332

Dari Tabel 2 tersebut, kemudian pada Gambar 3. berikut diperoleh hubungan *trend* yang terjadi antara variasi aktivitas dan dimasing-masing variasi ketebalan medium.



Gambar 3. Grafik *trend* atenuasi sumber ^{177}Lu dengan variasi aktivitas terhadap variasi katebalan medium

Probabilitas Interaksi Radiasi (Foton) dengan Materi

Interaksi radiasi ^{177}Lu dengan PMMA melibatkan tiga mekanisme utama, yaitu efek fotolistrik, hamburan Compton, dan pada energi yang sangat tinggi, produksi pasangan [18]. Dari hasil penelitian diketahui bahwa interaksi efek fotolistrik menyerap banyak atau hampir seluruh energi sehingga dosis radiasinya tinggi dan menjadi dominan pada probabilitas interaksi fantom. Pada energi relatif tinggi terjadi interaksi efek Compton. Namun, tidak semua energi foton diserap oleh elektron sehingga terjadi ionisasi sekunder. Ionisasi sekunder tersebut menyebabkan perubahan arah semakin kecil sehingga nilai probabilitas interaksi akan stabil.

Analisis Distribusi Dosis Sumber ^{177}Lu

Dari proses simulasi analisis distribusi dosis, didapatkan hasil yang dimuat dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ^{177}Lu dengan Aktivitas 1 mCi

No	Aktivitas (mCi)	Ketebalan (cm)	Distribusi dosis (Gy/h)
1	1	1	$1{,}41 \times 10^{-5}$
		2	$1{,}35 \times 10^{-5}$
		3	$1{,}30 \times 10^{-5}$
		4	$1{,}27 \times 10^{-5}$
		5	$1{,}24 \times 10^{-5}$
		6	$1{,}22 \times 10^{-5}$
		7	$1{,}16 \times 10^{-5}$
		8	$1{,}12 \times 10^{-5}$
		9	$1{,}07 \times 10^{-5}$
		10	$1{,}04 \times 10^{-5}$

Tabel 4. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ^{177}Lu dengan Aktivitas 2 mCi

No	Aktivitas (mCi)	Ketebalan (cm)	Distribusi dosis (Gy/h)
2	2	1	$2{,}81 \times 10^{-5}$
		2	$2{,}70 \times 10^{-5}$
		3	$2{,}59 \times 10^{-5}$
		4	$2{,}54 \times 10^{-5}$
		5	$2{,}49 \times 10^{-5}$
		6	$2{,}43 \times 10^{-5}$
		7	$2{,}33 \times 10^{-5}$
		8	$2{,}24 \times 10^{-5}$
		9	$2{,}13 \times 10^{-5}$
		10	$2{,}07 \times 10^{-5}$

Tabel 5. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ^{177}Lu dengan Aktivitas 4 mCi

No	Aktivitas (mCi)	Ketebalan (cm)	Distribusi dosis (Gy/h)
3	4	1	$5{,}63 \times 10^{-5}$
		2	$5{,}40 \times 10^{-5}$
		3	$5{,}19 \times 10^{-5}$
		4	$5{,}08 \times 10^{-5}$
		5	$4{,}98 \times 10^{-5}$
		6	$4{,}87 \times 10^{-5}$
		7	$4{,}65 \times 10^{-5}$
		8	$4{,}47 \times 10^{-5}$
		9	$4{,}26 \times 10^{-5}$
		10	$4{,}14 \times 10^{-5}$

Tabel 6. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ^{177}Lu dengan Aktivitas 22 mCi

No	Aktivitas (mCi)	Ketebalan (cm)	Distribusi dosis (Gy/h)
4	22	1	$3{,}09 \times 10^{-4}$
		2	$2{,}97 \times 10^{-4}$
		3	$2{,}85 \times 10^{-4}$
		4	$2{,}79 \times 10^{-4}$
		5	$2{,}74 \times 10^{-4}$
		6	$2{,}68 \times 10^{-4}$
		7	$2{,}56 \times 10^{-4}$
		8	$2{,}46 \times 10^{-4}$
		9	$2{,}34 \times 10^{-4}$
		10	$2{,}28 \times 10^{-4}$

Tabel 7. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ^{177}Lu dengan Aktivitas 46 mCi

No	Aktivitas (mCi)	Ketebalan (cm)	Distribusi dosis (Gy/h)
5	46	1	$6{,}47 \times 10^{-4}$
		2	$6{,}22 \times 10^{-4}$
		3	$5{,}97 \times 10^{-4}$
		4	$5{,}84 \times 10^{-4}$
		5	$5{,}73 \times 10^{-4}$
		6	$5{,}60 \times 10^{-4}$
		7	$5{,}35 \times 10^{-4}$
		8	$5{,}14 \times 10^{-4}$
		9	$4{,}90 \times 10^{-4}$
		10	$4{,}76 \times 10^{-4}$

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, data Tabel 3, 4, 5, 6, dan 7 menyajikan hasil nilai distribusi dosis yang telah didapatkan. Nilai distribusi dosis untuk sumber radioaktif ^{177}Lu dianalisis pada berbagai tingkat aktivitas dan ketebalan medium. Simulasi dilakukan dengan aktivitas mulai dari 1 mCi hingga 46 mCi, dengan variasi ketebalan medium dari 1 cm hingga 10 cm.

4 PEMBAHASAN

Analisis Koefisien Atenuasi Sumber ^{177}Lu

Berdasarkan data pada Tabel 2 koefisien atenuasi μ untuk sumber ^{177}Lu berada pada nilai 0,0327 cm^{-1} hingga 0,0332 cm^{-1}. Nilai ini menunjukkan kemampuan material dalam menangkap atau mengurangi kekuatan radiasi yang melewatinya. Fisisnya nilai atenuasi ini berpcu pada karakteristik bahan, seperti kerapatan, jenis zat, dan radiasi dari sumber [19]. Perbedaan kecil pada nilai koefisien atenuasi dikarenakan oleh perubahan foton yang dipancarkan oleh sumber ^{177}Lu pada tingkat aktivitas yang bervariasi. Pada Gambar 2., grafik ini menggambarkan pola penurunan intensitas radiasi yang sesuai dengan sifat eksponensial atenuasi radiasi yang ditentukan melalui kemiringan garisnya. Penurunan intensitas ini menjadi lebih jelas dengan bertambahnya ketebalan material, yang membuat jumlah interaksi antara radiasi dan atom penyusun material semakin besar. Studi yang dilakukan oleh Hidayati et al., (2016) juga mendapatkan hasil yang sebanding dimana nilai atenuasi berkurang seiring bertambahnya kedalaman dari material [20]. *Trend* penurunan intensitas untuk semua aktivitas menunjukkan pola yang serupa.

Probabilitas Interaksi Radiasi (Foton) dengan Materi

Pada interaksi fotolistrik, proses ini terjadi ketika foton gamma ^{177}Lu sepenuhnya diserap oleh atom dalam PMMA, menyebabkan pelepasan elektron dari kulit atom. Karena PMMA memiliki nomor atom efektif rendah (Z_{eff}≈6,), penyerapan fotolistrik lebih rendah dibandingkan bahan dengan nomor atom tinggi, tetapi tetap cukup optimal. Namun, pada hamburan Compton menjadi mekanisme utama interaksi. Hamburan Compton terjadi ketika foton bertumbukan dengan elektron terikat lemah atau elektron bebas, menghasilkan pelepasan elektron dan pengurangan energi foton. Dengan densitas PMMA sekitar 1,18 g/cm^3, probabilitas hamburan Compton meningkat secara proporsional dengan jumlah elektron per satuan volume bahan.

Analisis Distribusi Dosis Sumber ^{177}Lu

Pada aktivitas 1 mCi (Tabel 3), distribusi dosis awal tercatat sebesar $1{,}41\times10-5$ Gy/h pada ketebalan 1 cm. Namun, distribusi dosis ini menurun menjadi $1{,}04\times10-5$ Gy/h pada ketebalan 10 cm. Penurunan ini menunjukkan bahwa radiasi yang dihasilkan oleh sumber ^{177}Lu mengalami atenuasi signifikan, sehingga semakin tebal medium, semakin kecil intensitas radiasi yang mencapai area tertentu. Pola serupa juga terlihat pada aktivitas 2 mCi (Tabel 4), di mana distribusi dosis awal sebesar 2,8 × $10-5$ Gy/h pada ketebalan 1 cm menurun hingga $2{,}07\times10-5$ Gy/h pada ketebalan 10 cm. Pada aktivitas 4 mCi (Tabel 5), dosis awal tercatat sebesar $5{,}63\times10-5$ Gy/h pada ketebalan 1 cm, yang kemudian menurun hingga $4{,}14\times10-5$ Gy/h pada ketebalan 10 cm. Pada aktivitas yang lebih tinggi, yaitu 22 mCi (Tabel 6), distribusi dosis awal meningkat menjadi $3{,}09\times10-4$ Gy/h pada ketebalan 1 cm dan menurun menjadi $2{,}28\times10-4$ Gy/h pada ketebalan 10 cm. Pada aktivitas tertinggi dalam simulasi, yaitu 46 mCi (Tabel 7), distribusi dosis awal mencapai $6{,}47\times10-4$ Gy/h pada ketebalan 1 cm dan menurun hingga $4{,}76\times10-4$ Gy/h pada ketebalan 10 cm. Penggunaan detektor NaI(Tl) yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap pancaran gamma, mendukung konsistensi hasil yang diperoleh. Peningkatan aktivitas sumber menghasilkan intensitas radiasi yang lebih besar, tetapi efek atenuasi oleh medium tetap menjadi determinan utama dalam menurunkan intensitas radiasi pada ketebalan tertentu. Ketebalan medium dapat disesuaikan untuk mengontrol dosis yang diterima oleh jaringan biologis tertentu, sehingga hasil ini dapat digunakan dalam bidang medis.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa peningkatan aktivitas sumber radiasi ^{177}Lu secara signifikan memengaruhi nilai atenuasi yang dihasilkan ($0{,}0327\ cm-1$ hingga $0{,}0332\ cm-1$) dan ketebalan bahan atau slab fantom menentukan seberapa besar intensitas radiasi yang tersisa setelah melewati medium tersebut. Interaksi radiasi ^{177}Lu dengan material PMMA pada energi menengah hingga tinggi didominasi oleh efek fotolistrik dan hamburan Compton. Pada energi pancaran radiasi yang cukup tinggi, hamburan Compton menjadi mekanisme dominan karena energi ini berada dalam rentang yang optimal. Semakin tebal medium, semakin banyak energi foton yang diserap atau dihamburkan sebelum mencapai area target, sehingga distribusi dosis yang dihasilkan menjadi semakin kecil.

REFERENSI

[1] Malaka, M. (2019). Dampak Radiasi Radioaktif Terhadap Kesehatan. Foramadiahi: Jurnal Kajian Pendidikan Dan Keislaman, 11(2), 199.

[2] Mardiana, I., Prihandono, T., & Yushardi. (2019). Kajian Kestabilan Inti Unsur-Unsur Pada Proses Peluruhan Zat Radioaktif Dengan Pendekatan Energi Ikat

Inti Model Tetes Cairan. Jurnal Pembelajaran Fisika, 8(2), 101–106.

[3] Apriati, Y. N., & Santosa, I. E. (2017). Metode Analisis Model Peluruhan Bahan Radioaktif dengan Menggunakan Sensor Gaya dan Rekaman Video. Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya), 2, 276.

[4] Riskiana, D. N., Effendi, M., Sunardi, A., Imron, M., & Rohman Hakim, A. A. (2021). PERHITUNGAN PRODUKSI 177Lu BERDASARKAN VARIASI WAKTU IRADIASI DI REAKTOR RSG-GAS MENGGUNAKAN PROGRAM ORIGEN 2.1. Reaktor : Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir, 18(1), 27.

[5] Rutty Solla, G. A., Arguelles, M. G., Bottazzini, D. L., Furnari, J. C., Parada, I. G., Rojo, A., & Vera Ruiz, H. (2000). Lutetium-177-EDTMP for bone pain palliation. Preparation, biodistribution and pre-clinical studies. Radiochimica Acta, 88(3–4), 157–161.

[6] Arora, G., Mishra, R., Kumar, P., Yadav, M., Ballal, S., Bal, C., & Damle, N. (2017). Estimation of whole body radiation exposure to nuclear medicine personnel during synthesis of 177lutetium-labeled radiopharmaceuticals. Indian Journal of Nuclear Medicine, 32(2), 89–92.

[7] Yıldırım, A. (2024). Radiation attenuation properties of transparent aluminum oxynitride: a comprehensive study. European Physical Journal Plus, 139(5).

[8] 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.

[9] Yanyah, A., & Sutanto, H. (2015). Penentuan Nilai Koefisien Serapan Bahan Dan Dosis Radiasi Pada Variasi Kombinasi Kayu Dan Aluminium. Youngster Physics Journal, 4(1), 87–92.

[10] Kiarashi., (2015). Development of a realistic breast phantom for mammography and tomosynthesis. Medical Physics, 42(10), 5977-5987.

[11] Chung, J. P., Seong, Y. M., Kim, T. Y., Choi, Y., Kim, T. H., Choi, H. J., Min, C. H., Benmakhlouf, H., Chun, K. J., & Chung, H. T. (2018). Development of a PMMA phantom as a practical alternative for quality control of gamma knife® dosimetry. Radiation Oncology, 13(1), 1–9.

[12] Yaqin, A. A., Saragih, hon H., & Tohir, R. S. (2022). Optimisasi Dosis dan Kualitas Citra pada Pemeriksaan Thorak Anak di Rumah Sakit Mayapada. Jurnal Pengawasan Tenaga Nuklir, 2(2), 27–30.

[13] Zafar, M. S. (2020). Prosthodontic applications of polymethyl methacrylate (PMMA): An update. Polymers, 12(10), 1–35.

[14] Mourão, A. P., Alonso, T. C., & DaSilva, T. A. (2014). Dose profile variation with voltage in head CT scans using radiochromic films. Radiation Physics and Chemistry, 95, 254–257.

[15] Puchalska, M., Sihver, L. (2015). PHITS Simulations of Absorbed Dose Out-of field and Neutron Energy Spectra for ELEKTA SL25 Medical Linear Accelerator. Physics in Medicine & Biology. 60(2015): N261-270.

[16] Ulya, S., Widodo, P., Mailana, W., Haque, A. P. A., Firmansyah, O. A., Nuraeni, N., Hidayati, N. R., Marlina, M., Humani, T., & Patrianesha, B. B. (2024). The analysis of attenuation factors for therapeutic radioisotopes in Indonesia: Preparation of image quantification for radionuclide therapy dosimetry. AIP Conference Proceedings, 3210(1).

[17] Customs, U. S., Protection, B., Nuclear, D., & Office, D. (2011). Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling. April.

[18] Gumilar, R., Nur Fitriani, A., Ummutafiqoh, T., Subkhi, M. N., & Perkasa, Y. S. (2016). Studi Pengukuran Koefisien Atenuasi Material Zincalume Sebagai Perisai Radiasi Gamma. Wahana Fisika, 1(1), 21

[19] Setiyawan, I., Sutanto, H., & Sofjan Firdausi, D. K. (2015). Penentuan Nilai Koefisien Serapan Bahan Pada Besi, Tembaga Dan Stainless Steel Sebagai Bahan Perisai Radiasi. Youngster Physics Journal, 4(2), 219–224.

[20] Rahmah Hidayati, N., Widodo, P., Sekar Humani, T., Martalena RamlF, dan, Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, P., Jalan Lebak Bulus Raya, B., Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka Kawasan Puspiptek Gedung, P., & Selatan, T. (2016). GAMMA PADA PENCITRAAN 177LuUNTUK PROTOKOL DOSIMETRI TERAPI. 2016(49), 12070. _____