

**STUDI PENENTUAN KOEFISIEN ATENUASI
SUMBER ^{177}Lu MENGGUNAKAN *SOFTWARE* PHITS
UNTUK APLIKASI BIDANG KEDOKTERAN NUKLIR**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Sarjana Sains Ilmu Fisika pada Universitas Sriwijaya



MARTINUS RANDI TURU

NIM.08021182025020

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2024

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PENENTUAN KOEFISIEN ATENUASI SUMBER ^{177}Lu MENGUNAKAN *SOFTWARE* PHITS UNTUK APLIKASI BIDANG KEDOKTERAN NUKLIR

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Sains Ilmu Fisika Pada Universitas Sriwijaya

Oleh:

MARTINUS RANDI TURU

NIM.08021182025020

Indralaya, Januari 2025

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Ramlan
NIP. 196604101993031003


Okky Agassy Firmansyah, S.T., M.Sc.
NIP. 199306112018011003

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika

Dr. Prinsval Virgo, S.Si., M.T.
NIP. 197009101994121001

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan dibawah ini, Mahasiswa Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya:

Nama : Martinus Randi Turu

NIM : 08021182025020

Judul TA : Studi Penentuan Koefisien Atenuasi Sumber ¹⁷⁷Lu Menggunakan *Software* PHITS Untuk Aplikasi Bidang Kedokteran Nuklir

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang saya susun dengan judul tersebut adalah asli atau orisinalitas dan mengikuti etika penulisan karya tulis ilmiah sampai pada waktu skripsi ini diselesaikan, sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains di program studi Fisika FMIPA Universitas Sriwijaya.

Demikian surat pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun. Apabila dikemudian hari terdapat kesalahan ataupun keterangan palsu dalam surat pernyataan ini, maka saya siap bertanggung jawab secara akademik dan bersedia menjalani proses hukum yang telah ditetapkan.

Indralaya, 09 Januari 2025

Yang Menyatakan,



Martinus Randi Turu
NIM. 08021182025020

**STUDI PENENTUAN KOEFISIEN ATENUASI SUMBER ^{177}Lu
MENGUNAKAN *SOFTWARE* PHITS UNTUK APLIKASI BIDANG
KEDOKTERAN NUKLIR**

**Oleh:
Martinus Randi Turu
NIM.08021182025020**

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 $0,0327\text{ cm}^{-1}$ hingga $0,0332\text{ cm}^{-1}$. 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.

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

Indralaya, 13 Desember 2024

Menyetujui,

Pembimbing I



Dr. Ramlan

NIP. 196604101993031003

Pembimbing II



Okky Agassy Firmansyah, S.T., M.Sc.

NIP. 199306112018011003

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



STUDY ON DETERMINATION OF ^{177}Lu SOURCE ATTENUATION COEFFICIENT USING PHITS SOFTWARE FOR NUCLEAR MEDICINE APPLICATIONS

By:
Martinus Randi Turu
NIM.08021182025020

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.

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

Indralaya, 13 Desember 2024

Menyetujui,

Pembimbing I



Dr. Ramlan

NIP. 196604101993031003

Pembimbing II



Okky Agassy Firmansyah, S.T., M.Sc.

NIP. 199306112018011003

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Fritsyah Virgo, S.Si., M.T.

NIP. 197009101994121001

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu. Tugas Akhir yang telah penulis laksanakan di ORTN PRTKMMN-BRIN Lebak Bulus, Jakarta Selatan. Penulisan skripsi ini dilakukan dengan tujuan untuk memenuhi syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya, dengan skripsi yang berjudul **“STUDI PENENTUAN KOEFISIEN ATENUASI SUMBER ¹⁷⁷Lu MENGGUNAKAN *SOFTWARE* PHITS UNTUK APLIKASI BIDANG KEDOKTERAN NUKLIR”**.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu selama penyusunan laporan skripsi ini terutama kepada : Dosen Pembimbing I, Bapak Dr. Ramlan, Pembimbing II, Bapak Okky Agassy Firmansyah, S.T., M.Sc dan Ibu Nur Rahmah Hidayati, M.Sc, yang telah banyak memberikan bimbingan, bantuan, waktu, dan kesabaran dalam membantu penulis menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini. Selain itu saya juga mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak memberikan bantuan, bimbingan, dukungan, kritik dan saran yang bersifat membangun, diantaranya :

1. Tuhan Yang Maha Esa, yang senantiasa memberikan kesehatan dan kekuatan kepada saya sehingga bisa menyelesaikan skripsi ini hingga selesai.
2. Orang Tua, Keluarga, yang selalu mendo'akan, memberikan dukungan, inspirasi dan motivasi serta menjadi penyemangat bagi penulis.
3. Bapak Dr. Heru Prasetyo, M. Si. Selaku Kepala Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir.
4. Bapak dan Ibu Pembimbing, Staf BRIN, yang selalu memberikan dukungan, saran, dan masukan selama proses Tugas Akhir ini.
5. Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
6. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si, M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

7. Seluruh Dosen Jurusan Fisika Fakultas MIPA, selaku dosen yang selalu memberikan banyak arahan, saran, dan masukan yang sangat bermanfaat selama proses Tugas Akhir ini.
8. Bapak David dan Ibu Indah selaku Staf Administrasi Jurusan Fisika Fakultas MIPA.
9. Teman seperjuangan, baik yang di BRIN Lebak Bulus maupun yang di BRIN serpong, teman-teman fisika material 2020, squad teori material, dan teman-teman fisika UNSRI 2020 yang selalu memberikan inspirasi, motivasi, dan bantuan selama proses Tugas Akhir.
10. Almamater Universitas Sriwijaya yang tercinta dan yang selalu dibanggakan.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang banyak membantu penulis selama penelitian dan penulisan skripsi sehingga laporan skripsi ini dapat terselesaikan.

Semoga Tuhan membalas jasa semua pihak tersebut dengan sebaik-baiknya. Penulis juga menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna baik dalam bentuk tulisan ataupun teori yang berkaitan dengan skripsi. Maka dari itu, penulis memohon maaf dan besar harapan saya untuk saran dan kritik dari pihak-pihak instansi yang terkait atau pembaca yang bersifat membangun demi perbaikan masa mendatang. Penulis akhiri dengan mengucapkan banyak terima kasih dan semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat berupa pengetahuan baru bagi penulis pribadi maupun pembaca yang meminatinya.

Indralaya, Desember 2024

Penulis



Martinus Randi Turu
NIM. 08021182025020

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR SINGKATAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Koefisien Atenuasi	5
2.2. Sumber Radioaktif ¹⁷⁷ Lu	6
2.3. Interaksi Radiasi dengan Material	7
2.3.1. Efek Fotolistrik	7
2.3.2. Hamburan Compton.....	9
2.3.3. Produksi Pasangan	11
2.4. Fantom PMMA.....	13
2.5. Detektor NaI(Tl).....	14
2.6. Distribusi Dosis	16
2.7. Monte Carlo.....	17
2.8. PHITS	19
BAB III METODE PENELITIAN	30
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	30

3.2.	Metode Penelitian.....	30
3.3.	Alat dan Instrumen Penelitian	30
3.3.1.	Perangkat Keras	30
3.3.2.	Perangkat Lunak	31
3.4.	Data Material dan Dimensi Geometri	31
3.4.1	Data Material	31
3.4.2.	Dimensi Geometri.....	32
3.5.	<i>Setting</i> Simulasi.....	32
3.6.	Diagram Alir Penelitian.....	34
3.6.1.	Diagram Alir Penelitian	34
3.6.2.	Diagram Alir Algoritma PHITS	35
3.7.	Proses Pengolahan PHITS	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		37
4.1.	Analisis Koefisien Atenuasi Sumber ^{177}Lu	37
4.2.	Probabilitas Interaksi Radiasi (Foton) dengan Materi.....	43
4.3.	Analisis Distribusi Dosis Sumber ^{177}Lu	44
BAB V PENUTUP.....		48
5.1.	Kesimpulan.....	48
5.2.	Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA		50
LAMPIRAN.....		58

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Proses Efek Fotolistrik.....	8
Gambar 2.2. Proses Hamburan Compton	10
Gambar 2.3. Proses Produksi Pasangan.....	12
Gambar 2.4. Visualisasi Beberapa Penggunaan Fantom dalam Bidang Medis ..	13
Gambar 2.5. Detektor Sintilasi NaI(Tl)	15
Gambar 2.6 Model dalam PHITS	20
Gambar 3.1. <i>Setting</i> Simulasi pada PHITS.....	33
Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 3.3. Diagram Alir Algoritma PHITS	35
Gambar 4.1. Grafik <i>trend</i> atenuasi sumber ^{177}Lu dengan aktivitas 1 mCi	35
Gambar 4.2. Grafik <i>trend</i> atenuasi sumber ^{177}Lu dengan aktivitas 2 mCi	35
Gambar 4.3. Grafik <i>trend</i> atenuasi sumber ^{177}Lu dengan aktivitas 4 mCi	35
Gambar 4.4. Grafik <i>trend</i> atenuasi sumber ^{177}Lu dengan aktivitas 22 mCi	33
Gambar 4.5. Grafik <i>trend</i> atenuasi sumber ^{177}Lu dengan aktivitas 46 mCi	35
Gambar 4.6. Grafik <i>trend</i> atenuasi sumber ^{177}Lu secara keseluruhan dengan variasi aktivitas terhadap variasi ketebalan material.....	42

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. <i>Section</i> dalam <i>input</i> PHITS	21
Tabel 2.2. <i>Parameter Section</i> dalam <i>input</i> PHITS	22
Tabel 2.3. <i>Source Section</i> dalam <i>input</i> PHITS	24
Tabel 2.4. <i>Surface Section</i> dalam <i>input</i> PHITS	25
Tabel 2.5. <i>Tally</i> dalam <i>input</i> PHITS.....	28
Tabel 3.1. Material Penyusun Dimensi Geometri	32
Tabel 4.1. Hasil Nilai Koefisien Atenuasi Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 1 mCi	37
Tabel 4.2. Hasil Nilai Koefisien Atenuasi Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 2 mCi	38
Tabel 4.3. Hasil Nilai Koefisien Atenuasi Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 4 mCi	38
Tabel 4.4. Hasil Nilai Koefisien Atenuasi Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 22 mCi	39
Tabel 4.5. Hasil Nilai Koefisien Atenuasi Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 46 mCi	40
Tabel 4. 6. 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	40
Tabel 4.7. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 1 mCi... 44	44
Tabel 4.8. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 2 mCi... 44	44
Tabel 4.9. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 4 mCi... 45	45
Tabel 4.10. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 22 mCi...	45
Tabel 4.11. Hasil Nilai Distribusi Dosis Sumber ¹⁷⁷ Lu dengan Aktivitas 46 mCi...	45

DAFTAR SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Keterangan
^{177}Lu	Lutesium-177
PHITS	PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE SYSTEM
PMMA	Polymethyl methacrylate
mCi	millicurie
cm	centimeter
keV	kilo elektron Volt
SPECT/CT	Single Photon Emission Computed Tomography/ Computed Tomography
MeV	Mega elektron Volt
TeV	Tera electron Volt
NaI(Tl)	Sodium iodide, thalium doped
IAEA	International Atomic Energy Agency
PMT	Photo Multiplier Tube
PET	Positron emisi tomografi
m	meter
kg	kilo gram
Gy	Gray
Sv	Sievert
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
RIST	information system & technologies
KEK	High Energy Accelerator Research Organization)
BNCT	Boron Neutron Capture Therapy
INCL	Intranuclear cascade
JEND	Japannese Nuclear Data Library
h, β dan γ	hour, Beta dan Gamma
BRIN	Badan Riset dan Inovasi Nasional

BAPETEN	Badan Pengawas Tenaga Nuklir
mR	miliroentgen
HVL	Half Value Layer
mTc	Molybdenum technetium
RIT	radioimunoterapi
E	Energi
g	gram
pdf	probability distribution function
FORTRAN	Formula Translation
ATIMA	Attenuation and Interaction of Monte Carlo simulation for Radiation Transport
EGS	Electron Gamma Shower
JQMD	Japan Quantum Molecular Dynamics
GEM	Generalized Evaporation Model
SMM	Statistical Multifragmentation Model
SPAR	Special Purpose Analytical Reaction
JENDL	Japanese Evaluated Nuclear Data Library
EPDL	Evaluated Photon Data Library
EEDL	Evaluated Electron Data Library
ITS	Integrated TIGER System
GeV	Giga electron Volt
VOL	Volume
TMP	Temperatur
TRCL	Transformation
U	Universe
LAT	Lattice
ORTN PRTKMMN	Organisasi Riset dan Teknologi Nuklir Pusat Riset Teknologi Kesehatan dan Medis Nuklir
No.	Nomor

RT	Rukun Tetangga
RW	Rukun Warga
PC	Personal Computer
CPU	Central Processing Unit
GHz	Gigahertz
AMD	Advanced Micro Devices
MB	Megabyte
Zeff	Effective Atomic Number

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Radionuklida merupakan inti atom yang tidak memiliki kestabilan dan materi yang mengandung radionuklida dikenal sebagai bahan atau zat radioaktif (Malaka, 2019). Salah satu hal yang dapat berpengaruh terhadap kestabilan inti atom yakni keseimbangan antar jumlah proton dan neutron (Mardiana et al., 2019). Untuk mencapai kestabilan, maka bahan radioaktif tersebut akan meluruh dengan mengemisikan sinar radioaktif (Apriati & Santosa, 2017). Saat ini bahan radioaktif dikembangkan secara pesat pada sektor kesehatan terutama dalam kedokteran nuklir. Berkembangnya penggunaan bahan radioaktif termasuk kelompok lantanida yang berpotensi dan memiliki keuntungan tersendiri seperti spesialis dalam radioterapi. 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 di antara bahan-bahan radiolantanida, lutesium-177 yang kemudian juga sering untuk dipakai dalam bidang kedokteran nuklir. Penyebabnya karena ^{177}Lu mempunyai umur paruh yang relatif panjang sebesar 6,71 hari yang dipakai untukantisipasi terhadap masalah waktu saat menyimpan dan mendistribusikannya sejak dari pembuatan hingga saat digunakan, emisi radiasi beta yang diancarkan memiliki spektrum energi rendah, dengan puncak utama pada 497 keV (78,6%) dan 176 keV (12,2%) yang cukup baik untuk jaringan lunak dengan ukuran kecil, serta emisi radiasi memiliki spektrum energi 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 (Arora et al., 2017; Riskiana et al., 2021; Ruty Solla et al., 2000).

Meningkatnya kebutuhan akan penggunaan radioaktif untuk aplikasi kedokteran nuklir, kemungkinan paparan terhadap radiasi pengion juga akan semakin tinggi terutama di bidang medis non-sains dan industri, telah

meningkatkan risiko paparan radiasi pengion bahkan bagi orang-orang yang tidak berkerja secara langsung dengan radiasi. Banyaknya orang menggunakan radiasi pengion, sehingga mendorong percepatan studi tentang perlindungan radiasi (Yıldırım, 2024). Tujuannya adalah untuk meminimalkan paparan radiasi pada manusia dan lingkungan dengan menerapkan konsep seperti desain pelindung, pengendalian paparan, dan pengukuran dosis radiasi. Berdasarkan peraturan BAPETEN No. 4 Tahun 2013, 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. Jenis medium dan tingkat energi radiasi memengaruhi sifat interaksi tersebut, sehingga ketebalan material penahan yang diperlukan dapat divariasikan (Yanyah & Sutanto, 2015).

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. Studi atenuasi mengacu pada kemampuan slab fantom PMMA untuk mengurangi intensitas radiasi yang dihasilkan oleh sumber ^{177}Lu . Bahan PMMA yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi medis karena memiliki sejumlah keunggulan, seperti densitas yang rendah, biaya yang ekonomis, kemudahan dalam proses pengolahan, serta sifat fisik dan mekanik yang dapat dioptimalkan sesuai dengan kebutuhan sehingga memberikan respon konsisten terhadap radiasi (Zafar, 2020). Dalam penelitian oleh Mourão et al., (2014), 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 (Mourão et al., 2014).

Secara keseluruhan, penelitian tentang studi penentuan koefisien atenuasi sumber ^{177}Lu ini akan dilakukan dengan pendekatan simulasi Monte Carlo yang memanfaatkan *software* PHITS. PHITS dimanfaatkan karena efektif dalam memodelkan interaksi partikel dengan materi dan dapat memberikan estimasi yang akurat tentang atenuasi. Dengan pengetahuan yang akurat tentang atenuasi, pengiriman dosis radiasi dapat dioptimalkan, efektivitas dapat ditingkatkan, dan risiko efek samping dapat dikurangi.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana koefisien atenuasi sumber ^{177}Lu dengan slab fantom berbahan PMMA menggunakan *software* PHITS berbasis metode Monte Carlo ?
2. Bagaimana interaksi radiasi dengan materi slab fantom berbahan PMMA ?
3. Bagaimana distribusi dosis sumber ^{177}Lu dengan slab fantom berbahan PMMA ?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Dapat menentukan dan menganalisa koefisien atenuasi sumber ^{177}Lu dengan slab fantom berbahan PMMA menggunakan *software* PHITS berbasis metode Monte Carlo.
2. Mengetahui dan menganalisa interaksi yang terjadi pada saat partikel mengenai slab fantom berbahan PMMA.
3. Mengetahui dan menganalisa distribusi dosis sumber ^{177}Lu dengan slab fantom berbahan PMMA.

1.4. Batasan Masalah

Terdapat beberapa hal yang membatasi penelitian ini, yaitu :

1. Metode yang digunakan adalah metode Monte Carlo dengan *software* PHITS.
2. Emisi partikel dari sumber ^{177}Lu yang digunakan hanya gamma dengan energi 208 keV.
3. Variasi yang digunakan adalah variasi aktivitas (mCi) dan ketebalan slab fantom (cm).
4. Bahan slab fantom yaitu PMMA.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan beberapa manfaat, seperti :

1. Pengembangan pengetahuan dalam penerapan dan pemakaian *software* PHITS berbasis metode Monte Carlo untuk pemodelan.
2. Digunakan sebagai rujukan dalam pengujian lainnya dengan berbagai macam sumber radioaktif.
3. Sebagai pedoman dalam penelitian mendatang terkait pemodelan untuk eksperimen laboratorium dalam pengujian detektor dengan sumber radioaktif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z., Alkrytania, D., & Indrajati, I. N. (2017). Analisis Bahan Apron Sintetis Dengan Filler Timbal (Ii) Oksida Sesuai Sni Untuk Ppoteksi Radiasi Sinar-X. *Jurnal Forum Nuklir*, 9(1), 38. <https://doi.org/10.17146/jfn.2015.9.1.3562>
- 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. <https://doi.org/10.20961/prosidingsnfa.v2i0.16412>
- 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. <https://doi.org/10.4103/0972-3919.202245>
- Attix, F. H. (2004). Introduction To Radiological Physics and. *John Wiley & Sons, Inc*, 607.
- 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.
- Bushberg Jerrold T, Anthony Sieberst, Edwin M Leidholdt, John M Boone. (2012).The Essential Physics of Medical Imaging. Philadelphia, USA.
- 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. <https://doi.org/10.1186/s13014-018-1117-8>
- Customs, U. S., Protection, B., Nuclear, D., & Office, D. (2011). *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling*. April. www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-

15870rev1.pdf

- Das, A. and Ferbel, T. (2003). Introduction to nuclear and particle physics. World Scientific, London.
- Das, I. J., Cheng, C. W., & Watts, R. J. (2008). Accelerator beam data commissioning equipment and procedures: Report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM. *Medical Physics*, 35(9), 4186-4215.
- Dewi, R. A., Taji, S., Wardani, K., & Suharyana, D. (2023). Analisis Distribusi Dosis Proton pada Terapi Proton untuk Kanker Glioblastoma menggunakan Software MCNP6. *Jurnal Fisika*, 13(1), 40–50. <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jf/index>
- Fadjar, A. (2008). Monte Carlo Simulation Application in Project Cost Estimation. *SMARTek*, 6(4), 222–227. <http://jurnal.untad.ac.id/jurnal/index.php/SMARTEK/article/view/486>
- 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. <https://doi.org/10.17509/wafi.v1i1.4528>
- Hall, E. J. (2012). Radiobiology for the radiologist. Lippincott Williams & Wilkins.
- JAEA phits.jaea.go.jp. (2020, 21 Oktober) What is PHITS? Diakses dari phits.go.jp
JAEA phits.jaea.go.jp.
- Johns, H. E., & Cunningham, J. R. (1983). The physics of radiology. Charles C Thomas Publisher.
- Kenneth S. Krane. (1988). Introduction to Nuclear Physics, 2nd edition, John Wiley & Sons.
- Khan, F. M. (2014). The Physics of Radiation Therapy (3th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Kiarashi, N., Nolte, A. C., Sturgeon, G. M., Segars, W. P., Ghate, S. V., Nolte, L.

- W., Samei, E., & Lo, J. Y. (2015). Development of realistic physical breast phantoms matched to virtual breast phantoms based on human subject data. *Medical Physics*, *42*(7), 4116–4126. <https://doi.org/10.1118/1.4919771>
- Knoll, G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurement*. USA: John Willey & Sons, Inc.
- Kurniasari, N., Ramdani, R., Haryanto, F., Satya, Y., & Subkhi, M. N. (2016). Pengaruh Perubahan Jumlah dan Ukuran Voxel terhadap Percentage Depth Dose (PDD) pada Water Phantom Menggunakan Metode Monte Carlo-EGSnrc. *Snips*, *575*–580.
- Ladrière, T., Faudemer, J., Levigoureux, E., Peyronnet, D., Desmonts, C., & Vigne, J. (2023). Safety and Therapeutic Optimization of Lutetium-177 Based Radiopharmaceuticals. *Pharmaceutics*, *15*(4).
- Lestari, N. I., Setiawati, E., & Richardina, V. (2015). Detektor Pada Spektrometer Beta. *Youngster Physics Journal*, *4*(1), 23–30.
- Malaka, M. (2019). Dampak Radiasi Radioaktif Terhadap Kesehatan. *Foramadiahi: Jurnal Kajian Pendidikan Dan Keislaman*, *11*(2), 199. <https://doi.org/10.46339/foramadiahi.v11i2.204>
- 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.
- Marks, L. B., Yu, X., Vujaskovic, Z., Small, W., Folz, R., & Anscher, M. S. (2003). Radiation-induced lung injury. *Seminars in Radiation Oncology*, *13*(3), 333–345. [https://doi.org/10.1016/S1053-4296\(03\)00034-1](https://doi.org/10.1016/S1053-4296(03)00034-1)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.05.013>
- Nadia Surahmi, N. S., Kartika Sari, & Supriyanti. (2022). Pembuatan Phantom Cruris Dari Gips Sebagai Pengganti Tulang Manusia Di Rumah Sakit Pertamedika Ummi Rosnati Banda Aceh. *PERISAI: Jurnal Pendidikan Dan*

Riset Ilmu Sains, 1(1), 66–74. <https://doi.org/10.32672/perisai.v1i1.126>

Ntoy, S. G., & Sardjono, Y. (2017). Calculation of Bnct Dosimetry for Brain Cancer Based on Kartini Research Reactor Using Phits Code. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 19(3), 159. <https://doi.org/10.17146/tdm.2017.19.3.3634>

Podgorsak, E.B. (2005). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Student*. IAEA. Austria : IAEA.

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.

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 PAD A PENCITRAAN 177LuUNTUK PROTOKOL DOSIMETRI TERAPI*. 2016(49), 12070.

Rasito. (2013). *Materi Kuliah: Pengenalan MCNP untuk Pengkajian Dosis*. Jakarta: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional.

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. <https://doi.org/10.17146/bprn.2021.18.1.6281>

Rizani, A., Setia, W., Anam, C., & Carlo, S. M. (2012). Simulasi Monte Carlo Untuk Menentukan Dosis Sinar-X 6 Mv Pada Ketakhomogenan Medium Jaringan Tubuh. *Berkala Fisika*, 15(2), 49-56–56.

Rogers DWO, Faddegon BA, Ding GX, Ma C-M, We J. BEAM: (1995). a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. *Med Phys*;22(5):503- 524.

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. <https://doi.org/10.1524/ract.2000.88.3-4.157>
- Salam, M., Supriyatni, E., & Sains, P. (2016). *Kajian laju paparan radiasi pada titik pengukuran di reaktor kartini sebagai dasar penentuan kondisi batas operasi (kbo)*. 1–5.
- Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. ichiro, Kai, T., Tsai, P. E., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L., & Niita, K. (2018). Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55(6), 684–690. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>
- Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Furuta, T., Noda, S., Ogawa, T., Iwase, H., Nakashima, H., Fukahori, T., Okumura, K., Kai, T., Chiba, S., & Sihver, L. (2015). Overview of particle and heavy ion transport code system PHITS. *Annals of Nuclear Energy*, 82, 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.023>
- Setiawati, E., Susanto, R. E., & Arianto, F. (2022). Penentuan Faktor Koreksi Dosis Radiasi Sinar-X Linac 6 MV Pada Ketidakhomogenan Jaringan Tubuh dengan MCNPX. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop Dan Radiasi*, 18(1), 17. <https://doi.org/10.17146/jair.2022.18.1.6586>
- 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.
- Shiiba, T., Kuga, N., Kuroia, Y., et al. (2017). Evaluation of the accuracy of monoenergetic electron and beta-emitting isotope dose-point kernels using particle and heavy ion transport code system: PHITS. *Applied Radiation and Isotopes*. 128(2017): 199-203.
- Sumanto, J., Bachtiar, S., & Jalil, A. (2011). Kajian Kinerja Sistem Deteksi Antara Detektor NaI(Tl) dan CsI(Tl) Untuk Perangkat Renograf Portabel Jinjing. *Prima*, 8(2), 1–10.

- Syarip, Ahmad, B., & Nopianto, P. (2005). Kajian Aplikasi Metode Hamburan Compton Energi Ganda Untuk Pengukuran Densitas Fluida Dan Uji Tak Merusak Pipa. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 6(3), 1–12.
- 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). <https://doi.org/10.1063/5.0228022>
- Wegner, M., Gargioni, E., & Krause, D. (2023). Classification of phantoms for medical imaging. *Procedia CIRP*, 119, 1140–1145. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.154>
- Widyaningrum, T., Sarmini, E., Sholikhah, U. N., Triyanto, & Soenarjo, S. (2014). Optimasi Pemisahan ^{177}Lu Dari Yb_2O_3 Untuk Radioterapidengan Metode Kromatografi Kolom. Optimasi Pemisahan ^{177}Lu Dari Yb_2O_3 Untuk Radioterapidengan Metode Kromatografi Kolom. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Radioisotop, Radiofarmaka, Siklotron Dan Kedokteran Nuklir*, 1(1), 28–34.
- Yani, S. (2022). Analisa Distribusi Dosis Pada Fantom Homogen Dan Inhomogen Dengan Simulasi Monte Carlo. *Komunikasi Fisika Indonesia*, 19(1), 39. <https://doi.org/10.31258/jkfi.19.1.39-44>
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.53862/jupeten.v2i2.005>
- Yıldırım, A. (2024). Radiation attenuation properties of transparent aluminum oxynitride: a comprehensive study. *European Physical Journal Plus*, 139(5). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05173-4>

Zafar, M. S. (2020). Prosthodontic applications of polymethyl methacrylate (PMMA): An update. *Polymers*, *12*(10), 1–35.
<https://doi.org/10.3390/polym12102299>