

**VALIDASI UKURAN LOLOSAN ^{99}Mo DARI GENERATOR $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$
NON-FISI UNTUK MENGHASILKAN RADIONUKLIDA MEDIS $^{99\text{m}}\text{Tc}$**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar sarjana S1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh:

Nur Zulfa Ramadhanti

20106020034

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA YOGYAKARTA

2024

HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-810/Un.02/DST/PP.00.9/06/2024

Tugas Akhir dengan judul : Validasi Ukuran Lolosan Mo-99 dari Generator Mo-99/ Tc-99m Non-Fisi Untuk Menghasilkan Radionuklida Medis Tc-99m

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : NUR ZULFA RAMADHANTI
Nomor Induk Mahasiswa : 20106020034
Telah diujikan pada : Rabu, 22 Mei 2024
Nilai ujian Tugas Akhir : A-

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

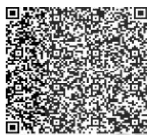
TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Siska Febriana
SIGNED

Valid ID: 665db11de4e8f



Penguji I

Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 665d605735832



Penguji II

Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 665d6ebd27f41



Yogyakarta, 22 Mei 2024

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 665f08d05db7

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nur Zulfa Ramadhanti
NIM : 20106020034
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Validasi Ukuran Lolosan ^{99}Mo dari Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Non-Fisi Untuk Menghasilkan Radionuklida Medis $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 15 Mei 2024

Penulis



Nur Zulfa Ramadhanti
NIM. 20106020034



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI

Hal : Persetujuan skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Nur Zulfa Ramadhanti

NIM : 20106020034

Judul Skripsi : Validasi Ukuran Lolosan ^{99}Mo dari Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Non-Fisi Untuk Menghasilkan Radionuklida Medis $^{99\text{m}}\text{Tc}$

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

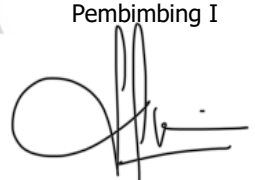
Wassalamualaikum wr.wb

Yogyakarta, 15 Mei 2024

Pembimbing II


Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
NIP. 19820126 200801 2 008

Pembimbing I


Siska Febriana, S.Si, M.Sc
NIP. 19890214 201403 2 005

MOTTO

“So, surely with hardship comes ease.”

Q.S Al-Insyirah : 5

“And do not kill yourselves, Allah is without a doubt most merciful to you”

Q.S An-Nisa :29

“I will no longer go full throttle instead, I will walk slowly enjoying every steps of the journey.”

-Mark Lee of NCT-

“Doing your best is great but it's okay to take a break when you feel overwhelmed.”

-Jeonghan of SEVENTEEN-

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatu

Puji syukur kehadiran Allah SWT. yang tidak pernah berhenti memberikan karunia dan hidayah sehingga dengan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Validasi Ukuran Lolosan ^{99}Mo dari Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Non-Fisi Untuk Menghasilkan Radionuklida Medis $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ” dengan segala kemudahan-Nya. Sholawat serta salam tak lupa tcurahkan kepada nabi besar kita, Nabi Muhammad SAW. beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya di yaumul akhir. Keberhasilan dalam penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari segala bentuk semangat dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
2. Ibu saya yang telah memberikan doa, cinta, sayang, semangat, dukungan, dan motivasi selama melakukan studi.
3. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Program Studi Fisika.
4. Ibu Siska Febriana, S.Si., M.Sc. dan Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing yang bersedia membimbing dan memberikan masukan serta nasihat selama penulis menempuh pendidikan sampai terselesaikannya tugas akhir ini penulis dalam tugas akhir ini.
5. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Fisika yang telah membagikan ilmunya.

6. Keluarga saya yang senantiasa memberikan doa dan dukungan untuk penulis.
7. Mark Lee, Cho Kyuhyun, Lee Dokyeom, Jeong Jeonghan, Kim Mingyu, Hong Joshua, dan Park Chanyeol yang menjadi motivasi untuk penulis.
8. Grup SEVENTEEN yang senantiasa menemani dan memberikan hiburan dan lagu-lagu yang menjadi penyemangat untuk penulis.
9. Serta untuk diri saya sendiri, terima kasih sudah bertahan sejauh ini. Terima kasih karena memutuskan untuk tidak menyerah sesulit apapun prosesnya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran dengan tulus. Penulis berharap bahwa tugas akhir ini dapat memberikan inspirasi dan pengetahuan baru bagi para pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum. Wr. Wb.

Yogyakarta, 15 Mei 2024

Penulis

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

VALIDASI UKURAN LOLOSAN ^{99}Mo DARI GENERATOR $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ NON-FISI UNTUK MENGHASILKAN RADIONUKLIDA MEDIS $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Nur Zulfa Ramadhanti
20106020034

INTISARI

Radionuklida medis $^{99\text{m}}\text{Tc}$ merupakan jenis radionuklida yang paling banyak digunakan di bidang kedokteran nuklir. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ merupakan hasil peluruhan dari ^{99}Mo . Salah satu parameter kontrol kualitas dari $^{99\text{m}}\text{Tc}$ adalah batas lolosan ^{99}Mo . Pentingnya mengetahui ukuran lolosan ^{99}Mo agar kualitas $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang dihasilkan dapat sesuai dan optimal untuk diagnosis dalam kedokteran nuklir. Penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi ukuran lolosan ^{99}Mo dari generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, apakah memenuhi standar acuan internasional yang ditetapkan. Bahan yang digunakan adalah generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang diproduksi di Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy, Indonesia dan sumber standar cair campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu . Pengukuran lolosan ^{99}Mo dilakukan menggunakan spektrometer gamma dengan detektor Germanium kemurnian tinggi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa lolosan ^{99}Mo pada elusi pertama generator terdapat lolosan tertinggi sebesar $0,233510238 \mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo} / \text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$, yang dimana hasil tersebut sudah melebihi ambang batas yang ditetapkan yaitu $0,15 \mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo} / \text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$. Sedangkan pada elusi kedua, elusi ketiga, elusi keempat, dan elusi kelima terdapat lolosan ^{99}Mo , namun lolosan-lolosan tersebut tidak melebihi batas dan memenuhi salah satu syarat dari parameter radionuklida medis $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

KATA KUNCI: Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, Molibdenum-99, Spektrometer Gamma, Teknesium-99m

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

VALIDATION ON MOLYBDENUM-99 (^{99}Mo) BREAKTHROUGH FROM NON-FISSION $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ GENERATOR TO PRODUCE TECHNETIUM-99M ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) MEDICAL RADIONUCLIDE

Nur Zulfa Ramadhanti
20106020034

ABSTRACT

The medical radionuclide $^{99\text{m}}\text{Tc}$ is the most widely used type of radionuclide in the field of nuclear medicine. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ is the decay product of ^{99}Mo . One of the quality control parameters of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ is the ^{99}Mo breakthrough limit. It is important to know the ^{99}Mo breakthrough so that the quality of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ produced can be suitable and optimal for diagnosis in nuclear medicine. This study aims to validate the ^{99}Mo breakthroughs activity from a non-fission $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator whether they meet the established international limit standard. This research used a non-fission $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator produced in multipurpose reactor G.A. Siwabessy, Indonesia and a mixed liquid standard source of ^{133}Ba and ^{152}Eu . The measurement of ^{99}Mo breakthrough using gamma spectrometer with High Purity Germanium (HPGe) detector. The results obtained showed that the ^{99}Mo elution in the first elution had the highest elution of 0,233510238 $\mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo} / \text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$, which exceeded the set limit of 0.15 $\mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo} / \text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$. While in the second, third, fourth, and fifth elution have the ^{99}Mo breakthrough, but these breakthrough did not exceed the limit and met one of the requirements of the $^{99\text{m}}\text{Tc}$ medical radionuclide parameter.

Keywords: $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator, Gamma Spectrometer, Molybdenum-99, Technetium-99m

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI	iii
MOTTO	iv
KATA PENGANTAR	v
INTISARI	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
GLOSARIUM	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Batasan Penelitian	6
1.5. Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Studi Pustaka	8
2.2. Landasan Teori	13
2.2.1. Molibdenum-99 (^{99}Mo)	13
2.2.2. Teknesium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)	17
2.2.3. Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	19

2.2.4. Kontrol Kualitas ^{99m}Tc	23
2.2.5. Spektrometer Gamma	25
2.2.6. Kalibrasi.....	30
2.2.7. Interaksi Radiasi Gamma dengan Materi.....	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	40
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	40
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	40
3.2.1 Perangkat Keras	40
3.2.2 Perangkat Lunak	41
3.2.3 Alat Penelitian.....	41
3.2.4 Bahan Penelitian	42
3.3. Prosedur Penelitian.....	43
3.3.1. Studi Pustaka.....	44
3.3.2. Persiapan Pengambilan Data	44
3.3.3. Pengukuran Sumber Standar Cair Campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu	44
3.3.4. Pengukuran <i>Bulk</i> ^{99}Mo	45
3.3.5. Pengukuran Lolosan ^{99}Mo dari Generator Non-Fisi $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$	47
3.4. Metode Pengolahan Data.....	48
3.4.1. Kalibrasi Energi	48
3.4.2. Kalibrasi Efisiensi.....	50
3.4.3. Validasi Sumber ^{133}Ba dan ^{152}Eu	51
3.4.4. Validasi Sumber <i>Bulk</i> ^{99}Mo	52
3.4.5. Penghitungan Lolosan ^{99}Mo dari Generator Non-Fisi $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$	53
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1. Hasil Penelitian.....	55

4.1.1. Kalibrasi Energi	55
4.1.2. Kalibrasi Efisiensi.....	58
4.1.3. Validasi Sumber ^{133}Ba dan ^{152}Eu	61
4.1.4. Validasi Sumber <i>Bulk</i> ^{99}Mo	61
4.1.5. Lolosan ^{99}Mo dari Generator Non-Fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	62
4.2. Pembahasan	65
4.2.1. Kalibrasi Energi	65
4.2.2. Kalibrasi Efisiensi.....	66
4.2.3. Validasi Sumber ^{133}Ba dan ^{152}Eu	68
4.2.4. Validasi Sumber <i>Bulk</i> ^{99}Mo	69
4.2.5. Lolosan ^{99}Mo dari Generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	72
5.1. Kesimpulan.....	72
5.2. Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA	74
LAMPIRAN	Error! Bookmark not defined.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema peluruhan ^{99}Mo dan $^{99\text{m}}\text{Tc}$	16
Gambar 2.2 Persediaan ^{99}Mo dari reaktor fisi di seluruh dunia	21
Gambar 2.3 Desain generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ berbasis kolom alumina.....	22
Gambar 2.4 Spektrometer Gamma HPGe No. GEM-S5020	26
Gambar 2.5 Perbandingan perangkat MCA merk ORTEC dan merk Canberra .	27
Gambar 2.6 Perbandingan spektrum detektor NaI(Tl) dan HPGe pada ^{60}Co	28
Gambar 2.7 Skema Kerja Detektor HPGe	29
Gambar 2.8 Skema hamburan Compton.....	33
Gambar 2.9 Skema efek fotolistrik.....	34
Gambar 2.10 Skema produksi pasangan	35
Gambar 2.11 Tiga interaksi dominan dari sinar gamma dengan materi.....	36
Gambar 2.12 Hubungan Intensitas Radiasi dengan Ketebalan Plat Timbal.....	38
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	43
Gambar 3.2 Kurva kalibrasi energi radiasi.....	49
Gambar 3.3 Kurva kalibrasi efisiensi	51
Gambar 4.1 Grafik kalibrasi energi jarak 11 cm dari detektor	56
Gambar 4.2 Grafik kalibrasi energi jarak 9 cm dari detektor	56
Gambar 4.3 Grafik kalibrasi energi jarak 7 cm dari detektor	57
Gambar 4.4 Grafik kalibrasi energi jarak 5 cm dari detektor	57
Gambar 4.5 Grafik kalibrasi energi jarak 3 cm dari detektor	58
Gambar 4.6 Grafik kalibrasi efisiensi jarak 11 cm dari detektor.....	58
Gambar 4.7 Grafik kalibrasi efisiensi jarak 9 cm dari detektor.....	59
Gambar 4.8 Grafik kalibrasi efisiensi jarak 7 cm dari detektor.....	59
Gambar 4.9 Grafik kalibrasi efisiensi jarak 5 cm dari detektor.....	60
Gambar 4.10 Grafik kalibrasi efisiensi jarak 3 cm dari detektor.....	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Studi Pustaka	12
Tabel 2.2 Rangkuman metode produksi ^{99}Mo (Hasan & Prelas, 2020)	13
Tabel 2.3 Daftar reaktor fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	20
Tabel 2.4 Perbandingan koefisien atenuasi material (Nuclear Power, 2023).....	37
Tabel 3.1 Rencana jadwal kegiatan penelitian	40
Tabel 3.2 Spesifikasi Perangkat Keras	41
Tabel 3.3 Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian	41
Tabel 3.4 Daftar Alat Penelitian.....	41
Tabel 3.5 Daftar Bahan Penelitian.....	42
Tabel 3.6 Rentang energi ^{133}Ba dan ^{152}Eu	49
Tabel 4.1 Hasil validasi aktivitas sumber standar cair	61
Tabel 4.2 Hasil aktivitas larutan ^{99}Mo dari bulk	61
Tabel 4.3 Hasil aktivitas larutan ^{99}Mo dari bulk (lanjutan).....	62
Tabel 4.4 Hasil lolosan ^{99}Mo dari generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ elusi pertama .	62
Tabel 4.5 Hasil lolosan ^{99}Mo dari generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ elusi kedua.....	63
Tabel 4.6 Hasil lolosan ^{99}Mo dari generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ elusi ketiga	63
Tabel 4.7 Hasil lolosan ^{99}Mo dari generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ elusi keempat.	64
Tabel 4.8 Hasil lolosan ^{99}Mo dari generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ elusi kelima ...	64
Tabel 4.9 Persamaan kalibrasi efisiensi.....	67
Tabel 4.10 Hasil elusi dengan lolosan tertinggi	71

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I. Dokumentasi Pengambilan Data di Laboratorium **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran II. Penghitungan Kalibrasi Energi dan Kalibrasi Efisiensi **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran III. Penghitungan Validasi Sumber ^{133}Ba dan ^{152}Eu **Error! Bookmark not defined.**

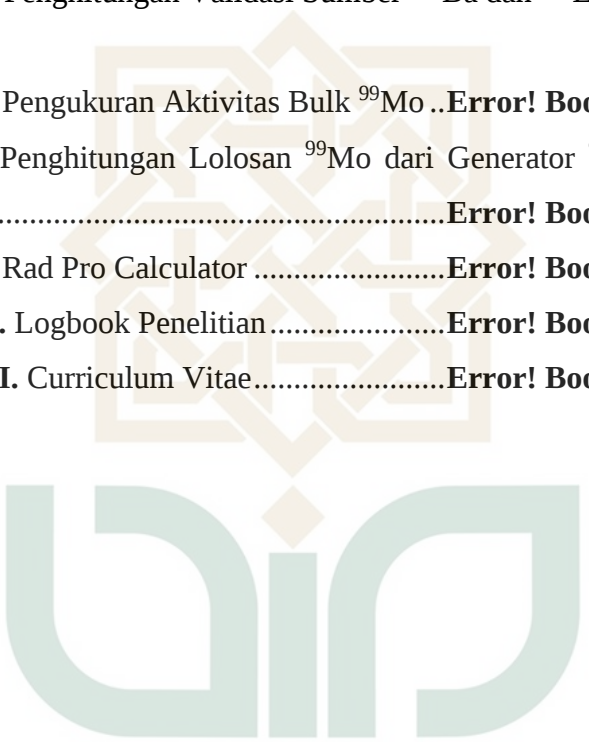
Lampiran IV. Pengukuran Aktivitas Bulk ^{99}Mo .. **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran V. Penghitungan Lolosan ^{99}Mo dari Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Non-Fisi
..... **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran VI. Rad Pro Calculator **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran VII. Logbook Penelitian **Error! Bookmark not defined.**

Lampiran VIII. Curriculum Vitae **Error! Bookmark not defined.**



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

GLOSARIUM

APD = Alat Pelindung Diri

BA = Bahan Acuan

CPS = *Count Per Second*, satuan laju cacah radiasi berdasarkan pembacaan alat

DPS = *Disintegration Per Second*, satuan laju cacah radiasi berdasarkan dari sumber radiasi

MCA = *Multi Channel Analyzer*

HEU = *High Enriched Uranium*

LEU = *Low Enriched Uranium*

HPGe = *High Purity Germanium*

R^2 = Nilai *Range Square*

Elusi = Proses pemisahan atau pengeluaran partikel radioaktif dari suatu medium

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Radiasi selalu menjadi bagian tak terpisahkan dari aktivitas manusia dalam rutinitas sehari-hari mereka. Radiasi merupakan suatu bentuk energi yang dipancarkan dalam bentuk partikel atau gelombang. Manusia tidak dapat merasakan radiasi secara langsung oleh panca indra, sehingga sangat berisiko apabila terpapar radiasi dengan dosis yang berlebihan. Radiasi dapat berupa pancaran sinar alfa, beta, maupun gamma.

Pancaran radiasi dapat dimanfaatkan dalam bidang pertanian, industri, dan kesehatan. Saat ini, penggunaan teknologi nuklir dalam bidang medis merupakan suatu perkembangan ilmu pengetahuan yang sangat penting. Kedokteran nuklir merupakan bidang teknologi kedokteran yang menggunakan senyawa radioaktif sumber terbuka untuk menganalisis perubahan fisiologis dan biokimia sehingga dapat digunakan untuk diagnosis, pengobatan, dan penelitian medis. Dalam kedokteran nuklir, radionuklida dapat dimasukkan ke dalam tubuh pasien (diagnostik *in vivo*) atau direaksikan dengan bahan biologis, termasuk darah, cairan lambung, dan urin yang diambil dari tubuh pasien (diagnostik *in vitro*). Terkait pemanfaatan radionuklida dalam bidang kedokteran nuklir, bahwa setiap jenis penyakit pasti ada cara pengobatannya sebagaimana yang tercantum pada hadits berikut :

مَا أَنْزَلَ اللَّهُ دَاءً إِلَّا أَنْزَلَ لَهُ شِفَاءً

Artinya : “Tidaklah Allah menurunkan suatu penyakit, kecuali Allah juga menurunkan obatnya” (H.R Imam Bukhari, Nomor 5678).

Berdasarkan hadits di atas, dapat disimpulkan bahwa setiap penyakit ada obatnya. Manusia dapat berusaha dan melakukan upaya pengobatan untuk menyembuhkan berbagai jenis penyakit, namun keputusan akhir tentang kesembuhan atau sebaliknya tetap menjadi kebijakan Allah. Penting bagi manusia untuk tidak hanya berserah diri tanpa melakukan usaha aktif dalam proses pengobatan.

Radiofarmaka diagnostik diberi tanda dengan radioisotop (juga disebut radionuklida) yang mengalami peluruhan dan menghasilkan radiasi elektromagnetik, khususnya dalam bentuk radiasi gamma atau sinar-X. Radioisotop merupakan isotop yang tidak stabil sehingga memancarkan energi radioaktif hingga mencapai bentuk stabil (IAEA, 2023). Salah satu jenis radioisotop medis yang paling banyak digunakan di dunia adalah Teknesium-99m (^{99m}Tc). ^{99m}Tc banyak digunakan dalam diagnosis pada kedokteran nuklir, sebanyak 85% dari sekitar 30 juta prosedur medis nuklir diagnostik yang dilakukan setiap tahun (Pillai dkk., 2013). Penggunaan ^{99m}Tc yang meluas disebabkan oleh sifat fisiknya yang sangat cocok untuk keperluan diagnosis yaitu memiliki waktu paruh yang singkat (6 jam), tidak memancarkan partikel bermuatan dan mempunyai sinar gamma 140 keV yang sangat ideal untuk kamera gamma (Uzunov dkk., 2018). ^{99m}Tc merupakan anak peluruhan dari Molibdenum-99 (^{99}Mo). Produksi radiosotop dapat dilakukan dengan beberapa metode yaitu iradiasi dalam reaktor nuklir, aktivasi neutron, akselerator partikel, dan generator. Generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ dirancang untuk

mengekstraksi ^{99m}Tc dari hasil peluruhan ^{99}Mo dan umumnya digunakan dalam kedokteran nuklir untuk berbagai prosedur diagnostik.

Berdasarkan produksi ^{99}Mo , generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ dikategorikan menjadi generator fisi dan generator non fisi. Generator fisi menggunakan ^{99}Mo yang dihasilkan dari reaksi fisi Uranium-235 (^{235}U), sedangkan generator non-fisi menggunakan ^{99}Mo yang dihasilkan selain dari reaksi fisi ^{235}U . Saat ini, sebagian besar pasokan ^{99}Mo di seluruh dunia diperoleh dari hasil fisi Uranium dari pengkayaan tinggi (*High Enriched Uranium*, HEU) dan sebagian kecil menggunakan pengkayaan rendah (*Low Enriched Uranium*, LEU). Menurut perkiraan di masa yang akan datang, produksi ^{99}Mo dengan generator fisi akan menurun disebabkan adanya pembatasan penggunaan Uranium, kesulitan dalam menangani limbah produk fisi, dan penuaan reaktor penelitian (National Academy of Sciences, 2018). Di Indonesia, ^{99}Mo dapat diproduksi melalui iradiasi ^{98}Mo dengan menggunakan neutron termal di reaktor nuklir ($^{98}\text{Mo} (n,\gamma) ^{99}\text{Mo}$). Namun demikian, ^{99}Mo yang dihasilkan dari reaksi tersebut memiliki tingkat aktivitas spesifik yang rendah (Saptiama dkk., 2016).

Radioisotop ^{99m}Tc yang dihasilkan melalui generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ non-fisi harus dipisahkan dari ^{99}Mo non-fisi untuk menghasilkan larutan ^{99m}Tc yang memiliki tingkat kemurnian radionuklida yang tinggi dan memenuhi standar radionuklida medis. Menurut standar US Pharmacopeia, jumlah ^{99}Mo yang ada dalam larutan ^{99m}Tc harus kurang dari 0,15 μCi dalam 1 mCi dari larutan ^{99m}Tc ($\leq 0,15 \mu\text{Ci}$). Pengukuran lolosan ^{99}Mo perlu untuk diketahui karena apabila terdapat lolosan ^{99}Mo dapat mengganggu atau mempengaruhi kualitas dari ^{99m}Tc dalam

proses diagnosa. Hal ini disebabkan oleh waktu paruh ^{99}Mo yang cukup lama sehingga dapat memberi dampak negatif dan berbahaya bagi tubuh manusia (Marlina dkk., 2021).

Analisis spesifik suatu radionuklida, dari segi kualitatif maupun kuantitatif dapat ditentukan dengan menggunakan spektrometer gamma. Spektrometer gamma adalah alat pengukuran yang dapat digunakan untuk menganalisis tingkat radioaktivitas dari sebuah radionuklida, mengidentifikasi unsur atau isotop radioaktif yang terkandung di dalamnya dan mendeteksi keberadaan pengotor isotop radioaktif (Nugraha dkk., 2013).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk melakukan pengukuran lolosan radionuklida menggunakan spektrometer gamma. Penggunaan spektrometer gamma secara efektif dapat digunakan untuk menentukan lolosan ^{99}Mo dalam radioisotop $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ditemukan dalam beberapa penelitian (Uzunov dkk., 2018; Febriana dkk., 2020; Al-Ghamdi dkk., 2022). Penelitian yang dilakukan Mawar dkk. (2020), menunjukkan bahwa waktu optimal pembentukan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ adalah hingga profil elusi mendeteksi lolosan ^{99}Mo .

Berdasarkan pada uraian permasalahan di atas, maka perlu dilakukan penelitian untuk memvalidasi ukuran profil hasil elusi ^{99}Mo dan aktivitas dari lolosan ^{99}Mo dengan spektrometer gamma. Adanya lolosan ^{99}Mo dalam larutan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dengan energi sinar gamma yang besar akan mempengaruhi pencitraan kamera gamma sehingga akan mengganggu proses diagnosis. Dalam penelitian ini, validasi ukuran ^{99}Mo dilakukan untuk memastikan keabsahan hasil, dengan tujuan

menghasilkan radioisotop ^{99m}Tc yang optimal bagi diagnosis dalam kedokteran nuklir.

1.2. Rumusan Masalah

Dari uraian yang telah disampaikan, maka penelitian ini memiliki beberapa rumusan masalah di antaranya:

1. Bagaimana hasil kalibrasi energi dan efisiensi sumber standar cair campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu ?
2. Bagaimana hasil validasi sumber standar cair campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu menggunakan sumber yang telah diketahui aktivitasnya dengan geometri yang sama yang akan digunakan untuk menghitung lolosan ^{99}Mo dari generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ non fisi?
3. Bagaimana hasil validasi hitungan ukuran lolosan ^{99}Mo dari generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ non fisi menggunakan kalibrasi sumber standar cair ^{133}Ba dan ^{152}Eu ?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan di antaranya:

1. Menentukan hasil kalibrasi energi dan efisiensi sumber standar cair campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu
2. Memvalidasi sumber standar cair campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu menggunakan sumber yang telah diketahui aktivitasnya dengan geometri yang sama yang akan digunakan untuk menghitung lolosan ^{99}Mo dari generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ non fisi.
3. Memvalidasi hasil hitungan ukuran lolosan ^{99}Mo dari generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ non fisi menggunakan kalibrasi sumber standar cair ^{133}Ba dan ^{152}Eu .

1.4. Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki batasan masalah di antaranya :

1. Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ non fisi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan generator hasil buatan BRIN.
2. Penggunaan *Multi Channel Analyzer* (MCA) dengan *software* Maestro yang digunakan untuk menghitung dan menganalisis cacahan dari radioaktivitas.
3. Kontrol kualitas radioisotop $^{99\text{m}}\text{Tc}$ pada penelitian ini hanya dibatasi pada pengukuran lolosan kemurnian radionuklida.
4. Sumber standar cair yang digunakan untuk kalibrasi adalah campuran Barium-133 (^{133}Ba) dan Europium-152 (^{152}Eu). Sumber standar cair dipilih karena ^{99}Mo yang diukur berbentuk cair sehingga pengukuran menggunakan geometri yang sama agar mendapatkan hasil pengukuran yang lebih valid.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Bagi peneliti, penelitian ini memberikan kajian terkait deteksi karakteristik peluruhan radionuklida ^{99}Mo dalam memperoleh $^{99\text{m}}\text{Tc}$ untuk keperluan diagnosis.
2. Bagi industri, penelitian ini dapat memberikan peluang untuk penggunaan generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ non-fisi untuk menghasilkan radionuklida ^{99}Mo .
3. Bagi penulis, penelitian ini diharapkan dapat menjadi sarana yang bermanfaat dalam mengimplementasikan pengetahuan terkait pemanfaatan radioisotop

untuk kedokteran nuklir dan bisa dijadikan sebagai bahan referensi penelitian selanjutnya.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian penelitian yang telah dilakukan serta analisa hasil yang telah diperoleh dapat disimpulkan bahwa

1. Hasil kalibrasi energi dan efisiensi sumber standar cair campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu menunjukkan nilai $R^2 = 1$. Nilai R^2 tersebut mengindikasikan linearitas yang sesuai hubungan antara sumbu X dan Y. Pada kalibrasi energi diperoleh grafik hubungan yang bersifat berbanding lurus antara energi dan nomor yang dimana seiring meningkatnya nomor *channel*, energi juga mengalami peningkatan signifikan. Kemudian pada hasil kalibrasi efisiensi, dapat dinyatakan dari hubungan nilai energi dan efisiensi diperoleh persamaan efisiensi yang digunakan untuk penghitungan aktivitas sumber standar cair, aktivitas *bulk* ^{99}Mo dan lolosan ^{99}Mo dari generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ non-fisi.
2. Hasil validasi aktivitas sumber standar cair campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu menunjukkan bahwa aktivitas pengukuran untuk ^{133}Ba dan ^{152}Eu sesuai dengan geometri yang sama, berdasarkan efisiensi yang dihitung dari persamaan kalibrasi efisiensi. Namun, aktivitas pengukuran untuk *bulk* ^{99}Mo menunjukkan ketidakkonsistenan dengan standar, dengan nilai aktivitas di bawah 80%. Perbedaan ini disebabkan oleh perbandingan aktivitas yang dilakukan dengan alat yang berbeda antara aktivitas pengukuran dan standar berbeda.
3. Hasil validasi hitungan ukuran lolosan ^{99}Mo dari generator non-fisi $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ menunjukkan bahwa hasil hitungan tervalidasi dengan menggunakan kalibrasi

sumber standar cair ^{133}Ba dan ^{152}Eu . Didapatkan hasil ukuran lolosan tertinggi pada elusi pertama sebesar $0,233510238 \mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo}/\text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$, yang dimana hasil tersebut sudah melebihi ambang batas yang ditetapkan yaitu $0,15 \mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo}/\text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$. Pada elusi kedua, elusi ketiga, elusi keempat dan elusi kelima terdapat lolosan ^{99}Mo , namun lolosan-lolosan tersebut tidak melebihi batas dan memenuhi salah satu syarat dari parameter radionuklida medis $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

5.2. Saran

Penelitian ini masih memiliki beberapa kekurangan yang dapat disempurnakan untuk penelitian berikutnya. Beberapa saran yang dapat dilakukan di antaranya :

1. Perlunya dilakukan tinjauan secara statistik terhadap data-data pengukuran untuk penelitian berikutnya. Hal ini bertujuan untuk mengetahui rentang sebaran data cacahan radiasi.
2. Perlu ketelitian dalam pengambilan data di laboratorium seperti mencuplik dan mengukur takaran sampel untuk meminimalisir kesalahan yang berpengaruh terhadap hasil pengukuran.
3. Pengukuran dapat dilakukan dengan menggunakan tipe spektrometer gamma lainnya seperti merk *Canberra* dengan *software Genie2K* untuk analisis spektrum.
4. Untuk penelitian berikutnya, dapat dipertimbangkan untuk menggunakan *software* analisis spektrum gamma lainnya seperti *FitzPeaks Gamma Analysis*.

DAFTAR PUSTAKA

- Awaludin, R. (2011). Radioisotop Teknesium-99m dan Kegunaannya. *Buletin ALARA*, **13(2)**, 61–66.
- Azam, M., Sofjan, K., Firdausi, & Silvani, S. (2006). Penentuan Karakterisasi Cerrobend Sebagai “Wedge Filter” Pada Pesawat Teleterapi Co-60. *Berkala Fisika*, **9(3)**, 131–135.
- Aziz, M., Hidayanto, E., & Lestari, D. D. (2015). Penentuan Aktivitas ^{60}Co dan ^{137}Cs Pada Sampel Unknown dengan Menggunakan Detektor HPGe. *Youngster Physics Journal*, **4(2)**, 189–196.
- Badan Standardisasi Nasional. (2023). *Pemilihan dan penggunaan bahan acuan untuk pengukuran/pengujian kimia*.
- Bertsche, K. (2010). Accelerator Production Options for ^{99}Mo . *International Particle Accelerator Conference*.
- Candra, H., Pujadi, & Wurdianto, G. (2010). Pengaruh Efek Geometri pada Kalibrasi Efisiensi Detektor Semikonduktor HPGe Menggunakan Spektrometer Gamma. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY*, 258–264.
- Candra, H., Wurdianto, G., & Holnisar. (2019). Analisis Kurva Kalibrasi Efisiensi Spektrometer Gamma Menggunakan Sumber Standar ^{152}Eu Pada Rentang Energi 121 – 1408 keV. *Prosiding Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir*, 503–507.
- Cember, H., & E. Johnson, T. (2008). *Introduction to Health Physics*. In *Medical Physics* (**4th ed.**). <https://doi.org/10.1118/1.3021454>
- Cherry, S. R., Sorenson, J. A., & Phelps, M. E. (2012). *Physics in Nuclear Medicine* (**4th ed.**). <https://doi.org/10.2967/jnumed.113.123125>
- Dance, D. R., Christofides, S., Mclean, I. D., & Ng, K. H. (2014). *Diagnostic Radiology Physics, A Handbook for Teacher and Student*. IAEA.

- El-Absy, M. A., El-Amir, M. A., Fasih, T. W., El-Shahat, M. F., & Ramadan, H. E. (2014). *Preparation of $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator Based on Alumina*. 1859–1864. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-2930-7>
- Febriana, S., Sarmini, E., & Nurmanjaya, A. (2020). Relative Method of ^{99}Mo Activity Measurement From Medical $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Dan Pendayagunaan Teknologi Nuklir*.
- Hasan, S., & Prelas, M. A. (2020). *Molybdenum-99 Production Pathways and The Sorbents for $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator Systems Using (n, γ) ^{99}Mo : A Review*. *SN Applied Sciences* **2**(11), 1–28.. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03524-1>
- Haynes, W. M., Lide, D. R., & Bruno, T. J. (2016). *CRC Handbook of Chemistry and Physics (95th ed.)*. CRC Press. RC Handbook of Chemistry and Physics 95th Edition.
- IAEA. (2008). *Technetium-99m Radiopharmaceuticals: Manufacture of Kits*. International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2008). *Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice*. In *International Atomic Energy Agency* (Issue 465).
- IAEA. (2013). *Non-HEU Production Technologies for Molybdenum-99 and Technetium-99m*. International Atomic Energy Agency
- IAEA. (2016). *Product Issues with Eluted Tc-99m*. Diakses 18 November 2023 dari https://humanhealth.iaea.org/HHW/Radiopharmacy/VirRad/Eluting_the_Generator/Generator_Module/Elution_of_the_99Mo99mTc_generator/Product_issues_with_eluted_99mTc/index.html
- IAEA. (2023). *Diagnostic radiopharmaceuticals*. Diakses 25 November 2023 dari <https://www.iaea.org/topics/diagnostic-radiopharmaceuticals>
- Irawan, M., Yusmanizar, Y., & Munawar, A. A. (2022). Kalibrasi dan Validasi Model Spektrum Inframerah Biji Kopi untuk Pengujian Kadar Air (*Moisture Content*) dan Asam Klorogenat (*Cholorogenic Acid*) Biji Kopi Secara Non-Destruktif. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, **7**(4), 838–845.

<https://doi.org/10.17969/jimfp.v7i4.22229>

- Jeon, Y. H., Cho, Y. H., Jung, J. H., & Choi, J. H. (2020). *Quality Control of Radiochemical Purity and Safety of ^{99m}Tc -HDP and ^{99m}Tc -Phytate Radiopharmaceuticals Labeling. International Journal of Radiation Research, 18(1).* <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijrr.18.1.179>
- Kurniawan, N., Setiawanto, A., & Ramadania, P. (2020). Perhitungan Nilai Efisiensi Pencacahan Hampiran Untuk Detektor HPGe Pada Spektrometer Gamma Menggunakan Metode Kuadrat Terkecil. *REAKTOR - Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.17146/bprn.2020.17.1.5745>
- Marck, S. C. Van Der, A. J., K., & Charlton, K. E. (2010). *The Options for The Future Production of The Medical Isotope ^{99}Mo* . *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 37, 1817–1820. <https://doi.org/10.1007/s00259-010-1500-7>
- Marlina, Ridwan, M., Abdullah, I., & Yulizar, Y. (2021). Recent Progress and Future Challenge of High-Capacity Adsorbent for Non-Fission Molybdenum-99 (^{99}Mo) in Appication of $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ Generator. *AIP Conference Proceedings* 2346.
- Marlina, Sriyono, E, L., Abidin, H, S., & -, K. (2016). Desain dan Performa Prototipe Generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ dengan Kolom Material Berbasis Zirkonium dan Kolom Alumina. *J. Kimia Dan Kemasan*, 38(2), 93–102.
- Marlina, Sriyono, Sarmini, E., Herlina, Abidin, Lubis, H., Saptiama, I., Setiawan, H., & Kadarisman. (2014). Kinerja Kolom Generator $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ dengan Material Berbasis Zirkonium Menggunakan ^{99}Mo dengan Aktivitas 250 mCi. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Radioisotop, Radiofarmaka, Siklotron Dan Kedokteran Nuklir*, 21–27.
- Maskur, M., H.G, A., Sarmini, E., Tahyan, Y., & Kurniasih, D. (2014). Uji Banding Antar Laboratorium Dalam Pengukuran Radioaktivitas Menggunakan Spektrometer Gamma *Jurnal Forum*, 8,190–199.

- Mawar, M., Astuti, S. D., & Febriana, S. (2020). Deteksi Karakteristik Peluruhan Radionuklida Medis ^{99}Mo Untuk Memperoleh $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Menggunakan Spektrometer Gamma dengan Sumber Standar Cair Campuran ^{133}Ba dan ^{152}Eu . *Jurnal Fisika Indonesia*, **24**(2), 96. <https://doi.org/10.22146/jfi.v24i2.54405>
- Melo, D., Rodrigues, G., Zahn, G. S., Genezini, F. A., & Moreira, E. G. (2021). Development of An Environmental Monitoring Station for HPGe Detectors. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, **9**, 1–14.
- MIRDA, I. (2019). Analisis ^{99}Mo Breakthrough dari Generator Medis $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Menggunakan Spektrometer Gamma dengan Sumber Standar Cair Campuran ^{133}Ba ^{137}Cs ^{60}Co . (Tugas Akhir), Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Hasanuddin, Makassar
- National Academy of Sciences. (2018). *Opportunities and Approaches for Supplying Molybdenum-99 and Associated Medical Isotopes to Global Markets*. In *The National Academy of Science Engineering Medicine*. <https://doi.org/10.17226/24909>
- Nuclear Power. (2023). *Gamma Ray Attenuation*. Diakses 17 Maret 2024 dari <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/interaction->
- Nugraha, L., Kadarusmanto, & Subiharto. (2013). Uji Banding Sistem Spektrometer Gamma dengan Metode Analisis Sumber Eu-152. *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, **10**, 22–30.
- Nuramdiani, D., Sabena, P. K., Elvira, L., & Mubarok, M. H. (2023). Uji Serapan Radiasi Bahan Timbal Limbah Aki Untuk Pemanfaatan Bahan Perisai Radiasi. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, **2**, 290–296.
- Papagiannopoulou, D. (2017). *Technetium-99m Radiochemistry for Pharmaceutical Applications*. *Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals*, **60**, 502–520. <https://doi.org/10.1002/jlcr.3531>

- Pillai, M. R. A., Dash, A., & Knapp, F. F. (2013). *Sustained Availability of ^{99m}Tc : Possible Paths Forward*. *Journal of Nuclear Medicine*, **54**(2) 313–323.
<https://doi.org/10.2967/jnumed.112.110338>
- Purwanto, A. T., & Nuraeni, E. (2013). Optimasi Parameter Spektroskopi Gamma dengan Detektor HPGE. *Prosiding Seminar Penelitian Dan Pengelolaan Perangkat Nuklir*, 307–312.
- Romsiah, & Meidalena, T. (2017). Validasi Metode dan Penetapan Kadar Nitrit (NO_2) pada Hasil Rebusan Sayuran Hijau (Kangkung, Brokoli, Seledri) Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis. *Jurnal Penelitian Sains*, **19**(1).
- Rosidi, Muljono, Sihono, & Suhardi. (2012). Uji Fungsi Detektor HPGe -GEM-35-P4 Ortec Spektrometer Gamma Lab. AAN Tank-BKTPB. *Prosiding Seminar Penelitian Dan Pengelolaan Perangkat Nuklir, September*, 156–162.
- Saptiama, I., Sarmini, E., Herlina, Sriyono, Abidin, & Kadarisman. (2016). Pembuatan Radionuklida Aktivasi Neutron dari Molibdinum Alam untuk Memperoleh Teknesium-99m (^{99m}Tc). *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, **22**(2), 121–132.
- Sari, H. L., Wahyu, D., & Budi, S. (2017). Penentuan Karakteristik Cacahan Pada Counter dengan Menggunakan Sumber Standar ^{152}Eu , ^{60}Co dan ^{137}Cs . *Youngster Physics Journal*, **6**(2), 151–156.
- Sasmi, T., Wijaya, I., Ratnasari, D., & Marzuki, A. (2020). Kajian Bahan Kaca Boro-tellurite untuk Shielding Radiasi Gamma Pada Kedokteran Nuklir Pengganti Bahan Konvensional. *National Conference PKM Centre UNS*, 124–129.
- Sayyed, M. I., Akman, F., Kaçal, M. R., & Kumar, A. (2019). *Radiation Protective Qualities of Some Selected Lead and Bismuth Salts in The Wide Gamma Energy Region*. *Nuclear Engineering and Technology*.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2018.12.018>
- Shihab, M. Q. (2005). *Tafsir Al-Misbah, Volme 1, Cetakan V*.

- Sholihuddin, I., Noor, D. J. A. E., & Bunawas, D. H. (2013). Kalibrasi Detektor NaI(Tl) Untuk Pemantauan Kontaminasi Bahan Radioaktif di Tanah Secara In-Situ. *Brawijaya Physics Student Journal, Mdc*, 7–14.
- Sulaiman, Sugiharto, Y., Setiawan, G., Chairuman, & G., A. H. (2019). Pengaruh Waktu Loading $^{99}\text{Mo}(n,\gamma)$ dengan Kolom Alumina (Al_2O_3) pada Generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. *Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia*, **4(3)**, 189–196.
- Takahashi, N., Fujiwara, M., Kurosawa, M., Tamura, M., Kosuge, Y., Kubota, T., Abe, N., & Takahashi, T. (2023). $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator Using Molybdenum Nanoparticles. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **333(1)**, 17–22. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-09173-z>
- Uzunov, N., Yordanova, G., Salim, S., Stancheva, N., Mineva, V., Meléndez-Alafort, L., & Rosato, A. (2018). Quality Assurance of Mo-99/Tc-99m Radionuclide Generators. *Acta Scientifica Naturalis*, **5(1)**, 40–47. <https://doi.org/10.2478/asn-2018-0006>
- Wahyudi, W., Iskandar, D., & Marjanto, D. (2017). Pengaruh Matriks Terhadap Sistem Pencacahan Sampel Menggunakan Spektrometer Gamma. *Jurnal Forum Nuklir*, **1(2)** 65. <https://doi.org/10.17146/jfn.2007.1.2.3273>
- Wirawan, R., Waris, A., Djamal, M., & Handayani, G. (2015). *Simulation of Energy Absorption pectrum in NaI Crystal Detector for Multiple Gamma Energy Using Monte Carlo Method. AIP Conference Proceedings*, **1656**. <https://doi.org/10.1063/1.4917139>
- Yani, S. (2022). Analisis Performa Timbal dan Besi Meredam Radiasi Foton 2 Mev dengan Simulasi Monte Carlo. *Journal Online of Physics*, **7(2)**, 13–18.
- Yuliandari, A., & Milvita, D. (2021). Penentuan Aktivitas Spesifik Radionuklida Alam pada Sumber Air Panas di Nagari Pariangan Sumatera Barat. *Jurnal Fisika Unand*, **10(3)**, 371–376. <https://doi.org/10.25077/jfu.10.3.371-376.2021>