

**PERHITUNGAN DOSIS SERAP SUMBER
PALADIUM-103 DAN SESIUM-131 DALAM
SIMULASI BRAKITERAPI KANKER PROSTAT
DENGAN MENGGUNAKAN *SOFTWARE MONTE
CARLO N-PARTICLE 6 (MCNP-6)***

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
diajukan oleh :
Mumung Ridhuan Munggara
18106020031

**PROGAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2023**



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-1448/Un.02/DST/PP.00.9/06/2023

Tugas Akhir dengan judul : Perhitungan Dosis Serap Sumber Paladium-103 Dan Sesium-131 Dalam Simulasi Brakiterapi Kanker Prostat Dengan Menggunakan Software Monte Carlo N Particle 6 (MCNP-6)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : MUMUNG RIDHUAN MUNGGERA
Nomor Induk Mahasiswa : 18106020031
Telah diujikan pada : Senin, 29 Mei 2023
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
SIGNED

Valid ID: 6482f925b7985



Penguji I

Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6482c61c11fbf



Penguji II

Nia Maharani Raharja, M.Eng.
SIGNED

Valid ID: 64829c89a2522



Yogyakarta, 29 Mei 2023

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 6483c0693fc73



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

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 : MUMUNG RIDHUAN MUNGGERA

NIM : 18106020031

Judul Skripsi : PERHITUNGAN DOSIS SERAP SUMBER PALADIUM-103 DAN SESIUM-131 DALAM SIMULASI BRAKITERAPI KANKER PROSTAT DENGAN MENGGUNAKAN MONTE CARLO N-PARTICLE (MCNP-6)


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.


Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 22 Mei 2023

Pembimbing I


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

Pembimbing II


Fajar Arianto, S.Si., M.Si.
NIP. 19860801 202104 1 001

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mumung Ridhuan Munggara

NIM : 18106020031

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Perhitungan Dosis Serap Sumber Paladium-103 Dan Sesium-131 Dalam Simulasi Brakiterapi Kanker Prostat Dengan Menggunakan *Software Monte Carlo N-Particle (MCNP-6)*” 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.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIAGA
YOGYAKARTA

Yogyakarta, 22 Mei 2023

Penulis



Mumung Ridhuan Munggara
NIM. 18106020031

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, dengan mengucapkan syukur kepada Allah SWT
Karya sederhana ini penulis persembahkan untuk kedua orang tua,
adik dan keluarga serta seluruh sahabat dan teman yang telah
membersamai penulis hingga titik ini.

Juga kepada Almamater tercinta UIN Sunan Kalijaga

Fakultas Sains dan Teknologi Program Studi Fisika

Terima kasih dan semoga bermanfaat

Aamiinn Ya Rabbal Alamiinn



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

“Satu Keteladanan Lebih Baik Daripada Seribu Nasihat”

(*La tahzan innallaha ma'ana*) لَا تَحْزَنْ إِنَّ اللَّهَ مَعَنَا

If you want a thing done well, do it yourself.

Napoleon Bonaparte

KATA PENGANTAR

Assalaamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Setiap kejadian memiliki waktu, cara, dan tempatnya sendiri. Terima kasih, segala puji bagi Allah SWT atas berkah dan rahmat serta karunia-Nya sampai saat ini penulis masih diberi kenikmatan dalam segala aspek serta dapat menyelesaikan kewajiban sebagai mahasiswa dengan terselesaikannya tugas akhir yang berjudul “Perhitungan Dosis Serap Sumber Paladium-103 Dan Sesium-131 Dalam Simulasi Brakiterapi Kanker Prostat Dengan Menggunakan *Software Monte Carlo N-Particle 6* (MCNP-6)”.

Shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW yang telah memberi syafaat dan teladan bagi umatnya. Selama pelaksanaan dan penyusunan tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Waryoto, Ibu Nurul Ngabidah, Bapak Rasidi Yulistiadi dan Ibu Sri Suparni sebagai orang tua dan kedua adik terkasih (Rasyad dan Afifhaah) yang senantiasa mendoakan dan memberikan semangat untuk mencapai kesuksesan.
2. Bapak Prof. Dr. Phil Al Makin, MA sebagai Rektor Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Dr. Hj. Khurul Wardati, M.Si. sebagai Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Ibu Anis Yuniati, Ph.D sebagai Kepala Program Studi Fisika yang telah membantu dalam segala urusan yang berhubungan dengan perkuliahan.
5. Ibu Dr. Nita Handayani M.Si dan Bapak Fajar Arianto M.Si sebagai pembimbing tugas akhir, terima kasih atas segala bimbingan, nasihat, motivasi, doa dan waktu yang diberikan, serta kesabarannya selama penyusunan tugas akhir ini. Semoga ibu dan bapak selalu diberikan kesehatan dan kebahagiaan.
6. Seluruh Dosen dan PLP Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah mengajarkan dan memberikan ilmunya.

7. Program Studi Fisika FSM UNDIP yang telah memberi kesempatan kepada penulis dalam melakukan penelitian pemodelan MCNP-6.
8. Keluarga Besar Rumah Jogja (Pak Broto, Mbak Tini, Mbak Puput, Mamas, Fafa, Renaldi dan Rania) yang telah memberikan semangat, doa dan dukungan.
9. Seluruh anggota KKN Gumelem 2021 (Harish, Via, Ibnu, Ayik, Wanda, Windi, Naza, Isti, Kirana, Anam) yang telah memberi pengalaman yang tidak akan pernah penulis lupakan selama menjalani kehidupan ini.
10. Keluarga Besar Sesepeuh Klub Bisnis Anggota (Berdy, Shafira, Irfan, Erika, Richy, Hamzah, Sulis) yang telah memberikan semangat, doa dan dukungan serta pengalaman yang mengesankan.
11. Kevin, Rina, Aeni, Lydia, Ahmad, Tri, Anggita, Munajat, Aelfian, Isti dan pejuang tugas akhir lainnya yang selalu mendukung dan memotivasi.
12. Manchester United sebagai klub sepakbola yang senantiasa kebersamai dalam suka maupun duka, menghibur dan menguatkan mental.
13. Teman-teman Fisika Berang-berang 2018 UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang selalu mendukung dan mendoakan.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang sudah membantu, mendoakan dan menyemangati hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan tugas akhir ini. Penulis juga berharap tugas akhir ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan bagi yang membacanya.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 15 Mei 2023

Penulis

**PERHITUNGAN DOSIS SERAP SUMBER PALADIUM-103 DAN
SESIUM-131 DALAM SIMULASI BRAKITERAPI KANKER PROSTAT
DENGAN MENGGUNAKAN *SOFTWARE MONTE CARLO N-PARTICLE 6*
(MCNP-6)**

**Mumung Ridhuan Munggara
18106020031**

INTISARI

Brakiterapi implan merupakan salah satu terapi *Low Dose Rate* (LDR) pada kanker prostat. Jenis terapi ini menggunakan sumber dengan energi dan tingkat penetrasi yang rendah sehingga organ di sekitar prostat tidak banyak menerima dosis serap. Penelitian ini menggunakan perhitungan dengan metode *Monte Carlo N-Particle 6* (MCNP-6) untuk menghitung interaksi foton dengan material organ. Tujuan utama penelitian ini adalah menentukan jumlah *seed* dan aktivitas sumber yang ideal untuk tercapainya dosis serap optimal pada prostat dan memberikan dosis serap minimum pada organ di sekitarnya. Organ di sekitar prostat antara lain testis, usus halus, dinding usus besar desenden, usus besar desenden, dinding usus besar sigmoid, usus besar sigmoid, dinding kandung kemih, dan kandung kemih. Penelitian ini menggunakan dua jenis sumber radioisotop yaitu ^{103}Pd dan ^{131}Cs yang masing-masing memiliki energi foton 21 keV dan 30 keV. Variasi yang dilakukan adalah penambahan jumlah *seed* dari 60 hingga 100 dengan interval 8 *seed* menjauhi titik pusat prostat secara simetris dan variasi aktivitas sumber dari 0,1 mCi hingga 0,6 mCi dengan interval 0,1 mCi untuk masing-masing jenis sumber. Hasil penelitian ini diperoleh hubungan bahwa semakin banyak jumlah *seed* maka semakin besar dosis serap yang diterima oleh prostat dan organ di sekitarnya, begitu juga dengan penambahan aktivitas sumber. Pengaruh penambahan jumlah *seed* dapat menaikkan dosis serap yang lebih signifikan daripada pengaruh penambahan aktivitas terhadap organ-organ di sekitar prostat. Dosis serap optimal untuk ^{103}Pd adalah 125 Gy dan 115 Gy untuk ^{131}Cs . Berdasarkan hasil simulasi dengan MCNP-6 diperoleh kombinasi ideal untuk dosis serap optimal yang didapat dari sumber ^{103}Pd adalah jumlah *seed* 60 dengan aktivitas 0,3 mCi dan sumber ^{131}Cs adalah jumlah *seed* 76 dengan aktivitas 0,5 mCi. Sumber ^{103}Pd lebih sedikit memberikan dosis serap pada organ di sekitar prostat dibandingkan dengan sumber ^{131}Cs .

Kata kunci: Kanker prostat, Brakiterapi implan, Dosis serap, MCNP-6

**CALCULATION OF ABSORBED DOSE OF PALLADIUM-103 AND
CESIUM-131 SOURCES IN PROSTATE CANCER BRACHYTHERAPY
SIMULATION USING MONTE CARLO N-PARTICLE 6 (MCNP-6)
SOFTWARE**

**Mumung Ridhuan Munggara
18106020031**

ABSTRACT

Implant brachytherapy is one of the therapies Low Dose Rate (LDR) in prostate cancer. This type of therapy uses a source with low energy and penetration rate so that the organs around the prostate do not receive much of the absorbed dose. This study uses a calculation method Monte Carlo N-Particle 6 (MCNP-6) to calculate the interaction of photons with organ materials. The main objective of this research is to determine the amount of seed and the ideal source activity to achieve the optimal absorbed dose in the prostate and provide the minimum absorbed dose in the surrounding organs. Organs around the prostate include the testes, small intestine, descending colon wall, descending colon, sigmoid colon wall, bladder wall, and bladder. This study uses two types of radioisotope sources namely ^{103}Pd and ^{131}Cs which each has a photon energy of 21 keV and 30 keV. Variations made is the addition of the amount of seed from 60 to 100 at intervals of 8 seed symmetrically away from the center of the prostate and variation of source activity from 0.1 mCi to 0.6 mCi at intervals of 0.1 mCi for each type of source. Results this study obtained the relationship that the more the amount of seed the greater the dose received by the prostate and surrounding organs, as well as the addition of source activity. The effect of increasing the amount of seed can increase the absorbed dose more significantly than the effect of adding activity to the organs around the prostate. Optimal absorbed dose for ^{103}Pd is 125 Gy and 115 Gy for ^{131}Cs . Based on the simulation results with MCNP-6, it is obtained that the ideal combination for the optimal absorbed dose is obtained from the source ^{103}Pd is the amount seed 60 with 0.3 mCi activity and source ^{131}Cs is the amount seed 76 with an activity of 0.5 mCi. Source ^{103}Pd provides a lower absorbed dose to the organs around the prostate compared to the source ^{131}Cs .

Keywords: Prostate cancer, Implant brachytherapy, Absorbed dose, MCNP-6.

DAFTAR ISI

PENGESAHAN TUGAS AKHIR	i
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
INTISARI	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	9
1.3 Tujuan Penelitian.....	9
1.4 Batasan Penelitian	10
1.5 Manfaat Penelitian.....	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1 Studi Pustaka	11
2.2 Landasan Teori.....	15
2.2.1 Kanker.....	15
2.2.2 Kanker Prostat.....	19
2.2.3 Radioterapi	24
2.2.4 Brakiterapi Prostat.....	26
2.2.5 Interaksi Foton dengan Materi	29
2.2.6 Interaksi Foton dengan Sel Tubuh	32
2.2.7 Dosimetri Radiasi.....	34
2.2.8 Sumber Radioisotop.....	38
2.2.9 MCNP (<i>Monte Carlo N-Particle</i>)	40
2.2.10 Wawasan Islam tentang Pengobatan Penyakit.....	42

BAB III METODE PENELITIAN	47
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	47
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	47
3.2.1 Alat Penelitian	47
3.2.2 Bahan Penelitian.....	48
3.3 Prosedur Penelitian	49
3.3.1 Pembuatan Kode <i>Input</i> Program	50
3.3.2 Desain <i>Seed</i> ¹⁰³ Pd dan ¹³¹ Cs serta Geometri Organ	53
3.3.3 Verifikasi Desain serta Variasi <i>Seed</i> dan Aktivitas.....	54
3.3.4 <i>Running</i> MCNP-6	54
3.3.5 <i>Output</i> MCNP-6.....	55
3.3.6 Visualisasi Program	55
3.3.7 Perhitungan Dosis Serap	55
3.4 Metode Analisis Data	58
3.4.1 Analisis Bentuk Geometri Organ dengan <i>Software</i> MCNP-6	58
3.4.2 Analisis <i>Output</i> Energi Deposisi.....	59
3.4.3 Analisis Perhitungan Dosis Serap	59
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	60
4.1 Desain <i>Seed</i> dan Geometri Organ.....	60
4.1.1 Desain <i>Seed</i> ¹⁰³ Pd.....	60
4.1.2 Desain <i>Seed</i> ¹³¹ Cs.....	61
4.1.3 Tata Letak <i>Seed</i>	62
4.1.4 Model Geometri Organ	63
4.2 <i>Output</i> Energi Deposisi	65
4.3 Perhitungan Dosis Serap	68
4.3.1 Dosis Serap Radioisotop ¹⁰³ Pd.....	69
4.3.2 Dosis Serap Radioisotop ¹³¹ Cs.....	72
4.4 Integrasi-Interkoneksi.....	79
BAB V PENUTUP	82
5.1 Kesimpulan.....	82
5.2 Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA	84
LAMPIRAN	87
CURRICULUM VITAE	103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Anatomi prostat	19
Gambar 2.2 Adenokarsinoma prostat	20
Gambar 2.3 Ilustrasi kanker prostat.....	20
Gambar 2.4 Prosedur brakiterapi prostat.....	28
Gambar 2.5 Ilustrasi radiasi brakiterapi prostat.....	28
Gambar 2.6 Diagram skematik efek fotolistrik	30
Gambar 2.7 Hamburan Compton.....	31
Gambar 2.8 Proses produksi pasangan	32
Gambar 3.1 Diagram alir prosedur penelitian	49
Gambar 4.1 Desain <i>seed</i> ^{103}Pd	60
Gambar 4.2 Desain <i>seed</i> ^{131}Cs	61
Gambar 4.3 Susunan <i>seed</i> dari depan (a) dan dari atas (b).....	62
Gambar 4.4 Model geometri 3D organ testis(1), prostat(2), kandung kemih(3) dan usus besar(4)	64
Gambar 4.5 Proses radiasi <i>seed</i> pada organ prostat.....	64
Gambar 4.6 Radiasi <i>seed</i> pada organ prostat menggunakan <i>phantom</i> ORNL- MIRD dari samping (a) dan dari depan (b)	65
Gambar 4.7 Grafik energi deposisi ^{103}Pd dengan variasi jumlah <i>seed</i>	67
Gambar 4.8 Grafik energi deposisi ^{131}Cs dengan variasi jumlah <i>seed</i>	67
Gambar 4.9 Grafik hubungan dosis serap dengan aktivitas sumber ^{103}Pd pada organ target	76
Gambar 4.10 Grafik hubungan dosis serap dengan aktivitas sumber ^{131}Cs pada organ target.....	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Derajat, skor, dan pola gleason	22
Tabel 2.2 Keterangan stadium kanker prostat	23
Tabel 3.1 Volume dan densitas dari organ di sekitar sumber.....	48
Tabel 3.2 Jenis kode <i>input cell cards</i> pada MCNP-6	51
Tabel 3.3 Contoh geometri <i>surface cards</i> pada MCNP-6	51
Tabel 3.4 Contoh <i>tally data cards</i> pada MCNP-6	52
Tabel 4.1 Energi deposisi ^{103}Pd dalam satuan MeV/trans	65
Tabel 4.2 Energi deposisi ^{131}Cs dalam satuan MeV/trans	66
Tabel 4.3 Dosis serap ^{103}Pd dengan jumlah 60 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	69
Tabel 4.4 Dosis serap ^{103}Pd dengan jumlah 68 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	69
Tabel 4.5 Dosis serap ^{103}Pd dengan jumlah 76 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	70
Tabel 4.6 Dosis serap ^{103}Pd dengan jumlah 84 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	70
Tabel 4.7 Dosis serap ^{103}Pd dengan jumlah 92 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	71
Tabel 4.8 Dosis serap ^{103}Pd dengan jumlah 100 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	71
Tabel 4.9 Dosis serap ^{131}Cs dengan jumlah 60 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	72
Tabel 4.10 Dosis serap ^{131}Cs dengan jumlah 68 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	72
Tabel 4.11 Dosis serap ^{131}Cs dengan jumlah 76 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	73
Tabel 4.12 Dosis serap ^{131}Cs dengan jumlah 84 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	73
Tabel 4.13 Dosis serap ^{131}Cs dengan jumlah 92 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	74
Tabel 4.14 Dosis serap ^{131}Cs dengan jumlah 100 <i>seed</i> dalam satuan Gy	74

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Proses simulasi dan konfirmasi hasil	87
Lampiran 2. Simulasi menggunakan MCNP-6	88
Lampiran 3. Perhitungan dosis serap	89
Lampiran 4. Kode <i>input</i> simulasi menggunakan sumber ^{103}Pd dan ^{131}Cs	91



DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

<u>Lambang</u>	<u>Keterangan</u>
A_0	Aktivitas awal radioisotop
D	Dosis serap
E	Energi deposisi
E_B	Fungsi kerja
E_k	Energi kinetik
erg	<i>Ergon</i>
Gy	<i>Gray</i>
h	Konstanta <i>Planck</i>
m	Massa organ
ρ	Densitas organ
τ	Umur hidup
$T_{1/2}$	Waktu paruh
<i>trans</i>	Tranformasi
U_s	Total transformasi
ν	Frekuensi
V	Volume organ
<u>Singkatan</u>	<u>Arti</u>
^{50}Co	Kobal-50
^{103}Pd	Paladium-103
^{125}I	Yodium-125
^{131}Cs	Sesium-131
^{192}Ir	Iradium-192
AAPM TG	<i>American Association of Physicists in Medicine Task Group</i>
APT	<i>Accelerator Production of Tritium</i>
ASCO	<i>American Society of Clinical Oncology</i>
CT	<i>Computed Tomography</i>
DNA	<i>Deoxyribonucleic Acid</i>
DRE	<i>Digital Rectal Examination</i>
GCO	<i>Global Cancer Observatory</i>
H	Hidrogen
HDR	<i>High Dose Rate</i>
HIV	<i>Human Immunodeficiency Virus</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
LANL	<i>Los Alamos National Laboratory</i>
LDR	<i>Low Dose Rate</i>
MCNP	<i>Monte Carlo N Particle</i>

MIRD	<i>Medical Internal Radiation Dose</i>
MRI	<i>Magnetic Resonance Imaging</i>
NCCN	<i>National Comprehensive Cancer Network</i>
O ₂	Oksigen
OAR	<i>Organ at Risk</i>
OH ⁻	Hidroksida
ORNL	<i>Oak Ridge National Laboratory</i>
PPSI	<i>Permanent Prostate Seed Implant</i>
PSA	<i>Prostate Specific Antigen</i>
RAD	<i>Radiation Absorbed Dose</i>
RSICC	<i>Radiation Safety Information Computational Center</i>
TNM	Tumor, Node dan Metastasis
TPS	<i>Treatment Planning System</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
 YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kanker merupakan penyakit yang berbahaya dan mematikan. Penyakit ini didefinisikan sebagai tumor ganas yang selnya bertumbuh lebih cepat dari pada sel tubuh pada umumnya sehingga dapat mempengaruhi atau merusak jaringan di sekitarnya serta mampu menyebar ke tempat yang jauh dalam tubuh (metastasis) (Ardhiansyah, 2019). Berdasarkan data WHO pada tahun 2018, kanker merupakan salah satu penyebab kematian terbesar di dunia. Data tersebut menunjukkan bahwa dari 18 juta penderita kanker 9,6 juta diantaranya meninggal dunia. Kanker dapat menyerang hampir seluruh bagian tubuh dan terdiri dari bermacam-macam jenis berdasarkan lokasinya seperti kanker paru-paru, kanker hati, kanker payudara, kanker prostat, dan masih banyak lagi. Kanker berada pada peringkat ketiga dalam kasus kematian global setelah *stroke* dan serangan jantung. Beberapa kanker yang sering menyerang pria diantaranya kanker paru-paru, prostat dan hati, sedangkan kanker yang sering menyerang wanita adalah kanker payudara, usus, rahim, dan kelenjar tiroid (Indarti dan Sekarutami, 2015; Lawrenti, 2019).

Kanker prostat merupakan salah satu jenis kanker yang paling sering diderita oleh pria. Diperkirakan sekitar 1,3 juta pria di seluruh dunia menderita kanker prostat. Prevalensi kanker prostat di Indonesia mencapai jumlah 13.563 kasus dengan angka kematian mencapai 4.863 kasus (*Global Cancer Observatory*, 2020). Kanker prostat menempati urutan kelima pada kasus kanker yang diderita pria di Indonesia. Risiko kanker prostat lebih tinggi diderita pria setelah usia 50 tahun,

sangat jarang terjadi pada pria usia di bawah 40 tahun. Hampir 2 dari 3 kasus dijumpai pada pria usia di atas 65 tahun. Data otopsi mengungkapkan prevalensi kanker prostat sebesar 50% pada pria usia antara 70-80 tahun (Lawrenti, 2019).

Kelenjar prostat adalah salah satu organ reproduksi pria. Kelenjar prostat terletak di bawah kandung kemih dan di depan rektum. Fungsi utama dari kelenjar prostat adalah sekresi cairan prostat yang merupakan bagian dari cairan semen. Otot pada kelenjar prostat membantu mendorong air mani ke uretra dalam proses ejakulasi. Kanker prostat adalah kanker yang menyerang pria dan terjadi pada organ prostat, hampir semua kanker prostat berasal dari sel-sel kelenjar yang dikenal dengan istilah adenokarsinoma prostat. Sebagian besar kanker prostat (70-80%) berasal dari zona perifer (Shaikhibrahim, 2012; Peng, 2015).

Dalam Islam, setiap penyakit yang diderita seorang muslim merupakan suatu ujian kesabaran dari Allah SWT. Mereka yang jatuh sakit dianjurkan untuk berdoa seraya berikhtiar mencari jalan kesembuhan. Melalui doa, mereka dapat meningkatkan keimanan. Orang muslim percaya bahwa ujian ini datang dari Allah SWT dan hanya Allah SWT yang dapat memberikan kesembuhan. Dalam Hadist Nabi terdapat banyak perintah untuk berobat dan penyebutan tentang obat-obat yang bermanfaat. Hal tersebut tidak bertentangan dengan tawakal seorang muslim kepada Allah SWT dan keyakinan bahwasannya kesembuhan berasal dari Allah SWT. Dari sahabat Jabir bin Abdillah RA, bahwasannya Nabi Muhammad SAW bersabda:

لِكُلِّ دَاءٍ دَوَاءٌ، فَإِذَا أُصِيبَ دَوَاءُ الدَّاءِ بَرَأَ بِإِذْنِ اللَّهِ

Artinya : “Semua penyakit ada obatnya. Jika sesuai antara penyakit dan obatnya, maka akan sembuh dengan izin Allah” (HR Muslim 2204).

Dalam sabda Nabi Muhammad SAW (لِكُلِّ دَاءٍ دَوَاءٌ) merupakan penguat motivasi bagi orang yang sakit maupun dokter atau orang yang memberikan pengobatan, sekaligus dorongan untuk mencari pengobatan. Termasuk petunjuk untuk berobat bagi diri Nabi Muhammad SAW sendiri dan juga memerintahkan keluarga serta sahabatnya untuk berobat ketika sakit (Hakim dan Ismail, 2020).

Kanker prostat adalah salah satu jenis kanker yang dapat diobati menggunakan teknik radioterapi. Radioterapi adalah terapi kanker yang menggunakan partikel atau gelombang berenergi tinggi seperti sinar-X untuk membunuh sel kanker (*American Cancer Society*, 2015). Metode tersebut memanfaatkan sifat ionisasi yang dihasilkan oleh sumber pada daerah yang terkena paparan radiasi. Sumber radiasi dapat berasal dari luar tubuh (eksternal) maupun dari dalam tubuh (internal) dengan cara implan atau ditanamkan sumber radioaktif. Salah satu teknik radioterapi untuk kanker prostat yaitu brakiterapi. Brakiterapi adalah metode radioterapi jarak dekat dengan menggunakan sumber radiasi yang dikapsulasi kemudian sumber tersebut diletakkan di volume target dengan harapan sel kanker mendapat dosis maksimal dan sel sehat di sekitarnya terutama OAR (*Organ at Risk*) mendapat dosis seminimal mungkin sehingga organ tersebut masih berfungsi normal. Brakiterapi hanya dapat dilakukan pada kasus kanker yang masih belum menyebar dan berukuran kecil. Terdapat dua jenis brakiterapi ditinjau dari penanaman implan yaitu implan sementara dan implan permanen. Implan sementara untuk laju dosis tinggi sehingga hanya membutuhkan waktu yang singkat, sedangkan implan permanen untuk laju dosis rendah dan membutuhkan waktu yang lama agar dosis maksimum tercapai (Podgorsak, 2005).

Penderita yang didiagnosis kanker prostat terlokalisasi menghadapi banyak pilihan pengobatan yaitu *expectant management*, prostatektomi radikal, terapi radiasi sinar eksternal dan brakiterapi. Penderita kanker prostat stadium lanjut dapat memilih pengobatan yaitu terapi deprivasi androgen, kemoterapi dan imunoterapi. Pilihan terapi tergantung pada faktor-faktor seperti pengelompokan risiko, stadium kanker, adanya gejala saluran kemih obstruktif, volume prostat, usia penderita dan penyakit penyerta, preferensi penderita, dan ketersediaan pengobatan. Penderita kanker prostat yang diobati dengan radioterapi, brakiterapi memiliki peran penting baik sebagai monoterapi atau sebagai penambah yang dikombinasikan dengan radiasi sinar eksternal (Georg dkk, 2014).

Ada dua jenis brakiterapi yaitu brakiterapi HDR (*High Dose Rate*) dan brakiterapi LDR (*Low Dose Rate*). Brakiterapi HDR dengan laju dosis tinggi hanya membutuhkan waktu yang singkat agar dosis pada volume target tercapai, namun hal tersebut berdampak pada sel sehat di sekitarnya. Brakiterapi LDR dengan implan permanen dapat menjadi solusi dalam pengobatan pada kasus kanker prostat dengan laju dosis rendah, sehingga dapat mengurangi dosis yang diterima oleh sel sehat di sekitar kanker. Metode implan permanen dapat dilakukan apabila kanker prostat masih dalam tahap awal bergantung pada stadium kanker, seberapa luas penyebaran kanker, kadar PSA (*prostate-specific antigen*), dan skor *gleason* atau tingkat ke-abnormal-an sel pada kelenjar prostat. Kanker prostat pada stadium T1 atau T2 dengan kadar PSA di bawah 10 ng/mL dan skor *gleason* kurang atau sama dengan 6 dapat diobati dengan brakiterapi ini. Metode brakiterapi ini dikenal dengan PPSI (*permanent prostate seed implant*) (Fikr dkk, 2019).

Sumber radioaktif yang digunakan dalam brakiterapi merupakan radioaktif dengan energi yang cukup besar namun memiliki waktu paruh yang singkat. Sumber radioaktif tersebut nantinya akan meluruh dan keluar dari tubuh penderita kanker melalui keringat, atau sistem ekskresi tubuh lainnya (Berlianti, 2022). Sebelum sumber radioaktif digunakan untuk brakiterapi, maka harus dilakukan perhitungan terlebih dahulu terhadap distribusi dosis serap pada medium (jaringan lunak tubuh manusia) yang terkena radiasi. Perhitungan tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa aktivitas sumber, jumlah sumber, dan umur sumber sesuai dengan yang diperlukan atau telah memenuhi persyaratan dalam pengobatan. Seperti yang direkomendasikan oleh protokol *AAPM report No. 84* yang merupakan pembaharuan dari *AAPM TG-43 (American Association of Physicists in Medicine Task Group No. 43)* bahwa setiap jenis sumber radioaktif yang digunakan dalam brakiterapi harus memiliki data parameter distribusi dosis serap (Purwaningsih, 2013). Setiap sumber radioaktif yang memancarkan radiasi gamma memiliki karakteristik tertentu yang berbeda antara satu sumber dengan sumber radioaktif lainnya. Misalnya, besar energi foton yang dipancarkan dalam setiap disintegrasi per sekon, jumlah fraksi energi yang dipancarkan dalam setiap disintegrasi per sekon, dan waktu paruhnya sehingga menghasilkan dosis serap dan umur pakai yang berbeda-beda (Rasito, 2013).

Penentuan dosis yang aman untuk organ tertentu dalam brakiterapi sangat penting. Selama ini penentuan dosis menggunakan cara yang sederhana yaitu menggunakan pendekatan bentuk sel kanker dan sumber radioaktif. Pendekatan yang sering dilakukan yaitu volume sel kanker diasumsikan berbentuk balok atau

bola, dan sumber radioaktif diasumsikan berbentuk titik sehingga dosis serap yang diperoleh tidak tepat. Meletakkan detektor dan zat radioaktif di dalam tubuh secara bersamaan sangat kecil kemungkinannya, sehingga diperlukan simulasi untuk menghitung dosis serap setepat mungkin. Metode *Monte Carlo* merupakan salah satu program yang dapat digunakan untuk mendefinisikan fungsi distribusi dosis, variasi dosis dan perhitungan dosis untuk brakiterapi (Sgouros, 2005).

Penelitian dengan menggunakan metode *Monte Carlo* untuk menghitung dosis serap dalam kasus brakiterapi prostat dengan teknik implantasi sudah banyak dilakukan. Seperti yang dilakukan oleh Usgaonker (2003), pemodelan organ yang berada di sekitar prostat seperti usus besar, kandung kemih, testis dan ginjal untuk kemudian dihitung dosisnya menggunakan MCNP versi 4C. Usgaonker (2003) menggunakan radionuklida dengan jenis Yodium-125 dan Paladium-103, kedua radionuklida tersebut digunakan sebagai sumber brakiterapi untuk kanker prostat. Dasar model yang digunakan pada penelitian tersebut menggunakan *software Sabrina Bodybuilder* untuk tubuh pria berusia 18 tahun. Usgaonker (2003) memodelkan sumber sebagai titik yang tersebar pada prostat. Penelitian lainnya mengenai dosimetri pada brakiterapi prostat menggunakan program MCNP dilakukan oleh Trindade dkk (2012). Penelitian tersebut melakukan pemodelan dengan menggunakan program SISCODES untuk mentransformasi *output* dari CT menjadi bentuk tiga dimensi yang kemudian diintegrasikan dengan *coding* dari MCNP. Tujuan utama dari penelitian tersebut adalah membandingkan dosimetri pada brakiterapi implan kelenjar prostat antara sumber ^{103}Pd dan ^{125}I . Kedua sumber tersebut disimulasikan berbentuk silinder dengan titanium sebagai pengungkung.

Lazarine (2006) pada penelitiannya melakukan kalkulasi dosis pada brakiterapi prostat dengan menggunakan *software* MCNPTM. Kalkulasi dosis tersebut menggunakan *phantom* dari ORNL-MIRD dan memodelkan *seed* untuk brakiterapi sebagai titik yang kemudian disebar secara merata dan secara acak. Radionuklida yang digunakan pada penelitian tersebut adalah ¹²⁵I yang berjumlah 98 *seed* dan masing-masing *seed* memiliki aktivitas sebesar 0,35 mCi.

Keakuratan penentuan dosis serap pada proses brakiterapi sangat penting demi tercapainya tujuan pengobatan yaitu kematian pada sel kanker dan sel sehat tetap berfungsi dengan baik. Simulasi sangat dibutuhkan untuk menentukan dosis serap yang optimal selama rangkaian terapi (Fikr dkk, 2019). Penelitian-penelitian di atas menggunakan pendekatan model sumber untuk brakiterapi hanya diasumsikan beberapa titik, sehingga hasil simulasi yang diperoleh tidak tepat. Optimalisasi diperlukan antara aktivitas sumber dengan jumlah *seed*. Optimalisasi tersebut digunakan agar dosis yang diberikan terpenuhi tanpa memerlukan banyak *seed* dan tetap dalam batas aman untuk organ di sekitarnya. *Software* yang digunakan pada penelitian Usgaonker (2003), Trindade dkk (2012), dan Lazarine (2006) merupakan MCNP versi lama. Seiring dengan perkembangan teknologi, *software* MCNP mengalami perkembangan pesat. MCNP-6 merupakan versi terbaru yang secara sederhana dan akurat digambarkan sebagai penggabungan dari MCNP-5 dan MCNPX, tetapi lebih dari hanya penjumlahan dari kedua kode tersebut. MCNP-6 adalah hasil dari upaya selama enam tahun oleh tim pengembangan kode MCNP-5 dan MCNPX (Goorley dkk, 2013).

Oleh sebab itu, penting dilakukan penelitian ini untuk menghitung dosis serap optimal sumber ^{103}Pd dan ^{131}Cs menggunakan metode *Monte Carlo*. Sumber tersebut memiliki waktu paruh yang cukup singkat, yaitu 16,99 hari dan 9,7 hari dibandingkan sumber-sumber lain seperti ^{125}I , ^{192}Ir , ^{226}Ra , dan ^{60}Co . Paladium-103 dan Sesium-131 merupakan sumber radioaktif yang memancarkan energi gamma, yang mana sinar gamma memiliki daya rusak yang cukup besar sehingga mampu membunuh sel kanker yang berada pada organ target. Energi gamma yang dimiliki ^{103}Pd dan ^{131}Cs adalah 21 keV dan 30 keV. Kelebihan sumber ^{103}Pd dan ^{131}Cs untuk brakiterapi kanker prostat adalah memberikan lebih sedikit dosis serap pada organ di sekitar target volume karena memiliki energi yang lebih kecil sehingga tingkat penetrasi yang lebih rendah (Trindade dkk, 2012). Metode pada penelitian ini adalah simulasi menggunakan *software* MCNP-6 (*Monte Carlo N-Particle 6*). Pemilihan MCNP-6 tersebut karena kemampuan MCNP-6 untuk mengangkut lebih banyak jenis partikel pada rentang energi yang sangat luas dan merupakan versi terbaru dari versi yang sudah ada sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan dosis serap optimal sumber ^{103}Pd dan ^{131}Cs pada brakiterapi kanker prostat dengan menggunakan *software* MCNP-6?
2. Bagaimana memperhitungkan jumlah *seed* ^{103}Pd dan ^{131}Cs yang ideal untuk mencapai dosis serap optimal pada kasus kanker prostat?
3. Bagaimana pengaruh variasi aktivitas sumber ^{103}Pd dan ^{131}Cs terhadap dosis serap optimal pada kasus kanker prostat?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan simulasi brakiterapi kanker prostat dengan sumber ^{103}Pd dan ^{131}Cs pada *software* MCNP-6 untuk menghitung dosis serap optimal pada organ prostat dan organ di sekitarnya menerima dosis serap yang paling rendah.
2. Memperhitungkan jumlah *seed* ^{103}Pd dan ^{131}Cs yang ideal untuk tercapainya dosis serap optimal pada organ prostat.
3. Menentukan pengaruh variasi aktivitas sumber ^{103}Pd dan ^{131}Cs yang ideal untuk mencapai dosis serap maksimum pada organ prostat dan dosis serap minimum pada organ di sekitarnya.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini memodelkan organ-organ seperti testis, usus halus, dinding usus besar desenden, usus besar desenden, dinding usus besar sigmoid, usus besar sigmoid, dinding kandung kemih, kandung kemih dan prostat.
2. Perhitungan dosis yang dilakukan berdasarkan elemen volume setiap organ.
3. Desain organ tubuh menggunakan standar *phantom adult male* dari ORNL-MIRD.
4. Kanker prostat yang disimulasikan adalah kanker prostat stadium awal yaitu stadium I hingga stadium II tanpa metastasis.
5. *Software* MCNP yang digunakan adalah MCNP-6 versi 1.0.
6. Variasi aktivitas sumber ^{103}Pd dan ^{131}Cs dilakukan dalam 6 aktivitas yaitu 0,1 mCi; 0,2 mCi; 0,3 mCi; 0,4 mCi; 0,5 mCi dan 0,6 mCi.
7. Jumlah *seed* yang divariasikan dari 60 hingga 100 dengan interval delapan buah *seed*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat digunakan sebagai referensi untuk pengobatan kanker prostat dengan teknik brakiterapi.
2. Menambah pengetahuan dan pemahaman mengenai teknik brakiterapi pada kasus kanker prostat terhadap dosis yang diterima penderita, serta mengetahui pemberian dosis yang tepat sesuai kebutuhan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasannya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi brakiterapi untuk mengetahui dosis serap pada kasus kanker prostat stadium awal tanpa metastasis dengan brakiterapi LDR berdasarkan jumlah *seed* dan aktivitas sumber radioisotop ^{103}Pd dan ^{131}Cs berhasil dilakukan menggunakan MCNP-6.
2. Jumlah *seed* yang paling ideal untuk sumber ^{103}Pd adalah 60 *seed* dan untuk sumber ^{131}Cs adalah 76 *seed*. Semakin banyak *seed* yang digunakan akan semakin besar dosis serap yang diterima oleh prostat dan organ di sekitarnya. Organ di sekitar prostat antara lain testis, usus halus, dinding usus besar desenden, usus besar desenden, dinding usus besar sigmoid, usus besar sigmoid, dinding kandung kemih, dan kandung kemih. Sumber ^{103}Pd lebih sedikit memberikan dosis serap pada organ di sekitar prostat dibandingkan dengan sumber ^{131}Cs .
3. Variasi aktivitas yang ideal untuk sumber ^{103}Pd adalah 0,3 mCi dan untuk sumber ^{131}Cs adalah 0,5 mCi. Semakin meningkatnya aktivitas semakin besar dosis serap yang diterima oleh prostat dan organ di sekitarnya. Penambahan jumlah *seed* lebih berpengaruh terhadap naiknya dosis serap dibanding dengan naiknya aktivitas.

5.2 Saran

Terdapat beberapa saran dari peneliti untuk penelitian selanjutnya diantaranya:

1. Menghitung laju dosis sehingga dapat diketahui waktu yang diperlukan untuk tercapainya dosis optimal.
2. Penelitian ini menyimulasikan perhitungan dosis serap pada brakiterapi kanker prostat stadium awal dengan brakiterapi LDR, kedepannya dapat ditingkatkan pada kanker prostat stadium lanjut hingga akhir dengan brakiterapi HDR.
3. Menggunakan lebih dari 2 sumber radioisotop antara lain ^{60}Co , ^{103}Pd , ^{125}I , ^{131}Cs , ^{192}Ir , dan ^{226}Ra untuk mengetahui jenis sumber yang paling ideal pada brakiterapi LDR.



DAFTAR PUSTAKA

- Afarideh, H. Ardaneh, K. dan Sadeghi, M. 2000. *Production of Pd-103 Seed from Rh Targets for Brachytherapy*. NRCAM, Cyclotron Accelerator Department. **2000** : 54-58
- American Cancer Society. 2022. *Prostate cancer*. Diakses 3 Februari 2023 dari <https://cancerstatisticscenter.cancer.org/#/>
- Ardhiansyah, A. 2019. *Deteksi Dini Kanker: Google Books (N.D)*. Diakses 16 Desember 2022 dari <https://books.google.co.id>
- Awaludin. R. 2007. *Peluang Pemanfaatan Brachytherapy*. *Buletin Alara*. **Vol.8, No.3, 2007** : 113-117.
- Beiser, A. 2003. *Concepts of Modern Physics. Sixth Edition*. McGraw Hill Co Inc. New York. Amerika Serikat.
- Berlianti, A. Y. dan Matius, T. 2022. *Analisis Perbandingan Hasil Simulasi Dosis Serap Kanker Payudara Pada Wanita Dalam Brakiterapi dengan Pd-103 Dan I-125 Menggunakan MCNP*. *Neutrino - Jurnal Pendidikan Fisika*. **Vol.5, No.2, Desember 2022** : 2620-3561.
- Cancer.Net. 2023. *Prostate Cancer: Stages and Grades*. Diakses 4 Februari 2023 dari <https://www.cancer.net/cancer-types/prostate-cancer/stages-and-grades>
- Cember. H. 1983. *Introduction to Health Physics, Chapter 6*. Pergamon Press, New York.
- Cheuck, L. 2023. *Prostate cancer diagnosis and staging, Medscape*. Diakses 3 Februari 2023 dari <https://emedicine.medscape.com/article/458011-overview#a7>
- Fikr, R. 2019. *Pengaruh Jumlah Seed dan Aktivitas Sumber ^{125}I dan ^{103}Pd Terhadap Dosis Terserap pada Simulasi Brakiterapi Kelenjar Prostat Menggunakan Simulator MCNPX*. (Skripsi), Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Georg, D. Hopfgartner, J. dan Gora, J. 2014. *Dosimetric Considerations to Determine the Optimal Technique for Localized Prostate Cancer Among External Photon, Proton, or Carbon-Ion Therapy and High-Dose-Rate or Low-Dose-Rate Brachytherapy*. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. **Vol.88, 2014** : 22-715
- Global Cancer Observatory. 2020. *International Agency for Research on Cancer*. Diakses 4 Februari 2023 dari [360-indonesia-fact-sheets.pdf \(iarc.fr\)](https://gco.iarc.fr/360-indonesia-fact-sheets.pdf).
- Gondhowiardjo, S. 2003. *Brakiterapi dalam Terapi Kanker Anorektal*. *Jurnal Makara Kesehatan*. **Vol.7, No.2, 2003** : 63-66.

- Goorley, T. Pelowitz, D. dan Zukaitis, T. 2012. *Initial MCNP 6 Release Overview*. LANL, Nuclear Technology. **LA-UR-11-07082. No.180, Desember 2012** : 298-315.
- Gray, H. 1995. *Gray's Anatomy. Edisi 15*. PA: Barnes & Noble. Philadelphia.
- Hakim, M. dan Ismail, S. 2020. *THIBBUN NABAWI: Tinjauan Syariat dan Medis*. Gema Insani. Jakarta.
- Indarti, A. dan Sekarutami, M. 2015. *Tatalaksana Kanker Prostat*. *Jurnal Radioterapi & Onkologi Indonesia*. **Vol.6, No.1, Januari 2015** : 19-28.
- Kasmudin. 2017. *Analisis Karakteristik Beberapa Sumber Radiasi Gamma untuk Brakiterapi dengan Menggunakan MCNP-6*. **21-23 November 2017** : 101-109.
- Krane, K. 2012. *Modern Physics. Third Edition*. Department of Physics, Oregon State University. United States of America.
- Lawrenti, H. 2019. *Perkembangan Terapi Kanker Prostat*. *Continuing Medical Education*. **Vol.46, No.8, 2019** : 278.
- Lazarine, A. D. 2006. *Medical Physics Calculation MCNP: A Primer*. (Tesis), Texas A&M University, Texas.
- Marieb, R. N. 1998. *Human Anatomy & Physiology, 4th edition*. CA: Benjamin/Cummings Science Publishing. Menlo Park. California.
- Meigooni, A, S. Sowards, K. dan Soldano, M. 2000. *Dosimetric Characteristics of the Intersource Palladium-103 Brachytherapy Source*. *Medical Physics*. **Vol.27, No.5, 2000** : 1093-1099.
- Mayadev, Jyoti. Benedict, H, Stanley. dan Kamrava, Mitchell. 2017. *Handbook of Image-Guided Brachytherapy*. University of California. Sacramento. USA.
- Muhtarom. 2011. *Prostate Cancer Radioactive Seed Implant: Ultrasound-guided Permanent Seed Prostate Brachytherapy*, Radiation Medical Group.
- Muslih, I. 2015. *Dasar-Dasar Pemrograman MCNPX*. Pusat Sains dan Teknologi Akselerator-BATAN. Yogyakarta.
- National Comprehensive Cancer Network. 2022. *Guidelines for Patients. Prostate Cancer Advanced Stage*. Diakses 27 Desember 2022 dari [NCCN Guidelines for Patients: Advanced-Stage Prostate Cancer](#)
- Peng, Y. Chen, Q. Gu, M. Chen, Y. Zhang, M. dan Zhou, J. 2015. *Human Stromal Cells in the Peripheral Zone of the Prostate Promote Tumorigenesis of Prostatic Cancer Stem Cells Through Up-Regulation of C-Kit Expression*. *Journal of Cancer*. **Vol.6, No.8, 2015** : 85-776.
- Podgorsak, E. B. 2005. *Radiation Oncology Physics: Handbook for Teacher and Students*. IAEA, Vienna.

- Purwaningsih, A. 2013. *Simulasi Dosis Radial Sumber Brakiterapi Iridium-192 Tipe H-01 dengan Menggunakan MCNPX 2.6.0. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan Pusat Radioisotop dan Radiofarmaka BATAN*. Jakarta. 8-9 November 2013.
- Rasito. 2013. *Pengenalan MCNP untuk Pengkajian Dosis, Pusat Pendidikan dan Pelatihan*. BATAN. Jakarta.
- Reed, L, Alexis. 2007. *Medical Physics Calculations With MCNPTM: A Primer*. Los Alamos National Laboratory, X-3 MCC. Texas A&M University. Boston.
- Reza, F. Mondjo, dan Agung, Alexander. 2017. *Calculation of Absorbed Dose Distribution for Breast Brachytherapy Simulation By CS-1 ¹³¹Cs Seed and ADVANTAGETM ¹⁰³Pd Seed Using Monte Carlo N Particle Extended Simulator*. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*. **Vol.2, No.2, Februari 2017** : 65-74
- Rianaris, A. 2011. *Simulasi Penentuan Dosis Terserapan pada Brachytherapy Prostat Menggunakan Software MCNP-5*. (Skripsi), FMIPA, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Saidi, P. Sadeghi, M. dan Hosseini, S, H. 2011. *Thermoluminescent Dosimetry of the IR06-¹⁰³Pd Brachytherapy Source*. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. **Vol.12, No.4, 2011** : 286-295.
- Sgouros, G. 2005. *Dosimetry of Internal emitters*. *Journal of Nuclear Medicine*, **Vol.46, No.1, Januari 2005** : 18-27
- Shaikhibrahim, Z. Lindstrot, A. Ellinger, J. Rogenhofer, S. Buettner, R. dan Perner, S. 2012. *The Peripheral Zone of the Prostate is More Prone to Tumor Development Than the Transitional Zone: Is the ETS Family the Key*. *Molecular Medicine Reports*. **Vol.5, 2012** : 6-313.
- Sukardja, I, D. 2000. *Onkologi Klinik*. Airlangga University Press. Surabaya.
- Supriyanto, W. 2010. *Ancaman Penyakit Kanker: Deteksi Dini & Pengobatannya*. Cahaya Ilmu. Yogyakarta.
- Trindade, B, M. Christóvão, M, T. Trindade D, F, M. Falcão, P, L. dan Campos, T, P, R. 2012. *Comparative dosimetry of prostate brachytherapy with ¹²⁵I and ¹⁰³Pd seeds via SISCODES/MCNP*. *Radiol Bras*. **Set/Out;45(5), 27 Agustus 2012** : 267-272.
- Usgaonker, S. R. 2003. *MCNP Modeling of Prostate Brachytherapy and Organ Dosimetry*. Texas A&M University, Texas.
- X-5 Monte Carlo Team. 2003. *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory*. Los Alamos National Laboratory. **LA-UR-03-1987, April 2003**