

**ANALISIS PERBANDINGAN DOSIS SUMBER IRIDIUM-192 DAN
COBALT-60 PADA BRAKITERAPI KANKER SERVIKS BERBASIS
*MONTE CARLO N-PARTICLE 6 (MCNP-6)***

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika

diajukan oleh:
Muhammad Anwar Prasetya
21106020021

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

2025



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-1309/Un.02/DST/PP.00.9/07/2025

Tugas Akhir dengan judul : ANALISIS PERBANDINGAN DOSIS SUMBER IRIDIUM-192 DAN COBALT-60 PADA BRAKITERAPI KANKER SERVIKS BERBASIS MONTE CARLO N-PARTICLE 6 (MCNP-6)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : MUHAMMAD ANWAR PRASETIA
Nomor Induk Mahasiswa : 21106020021
Telah diujikan pada : Selasa, 24 Juni 2025
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: 686b71ea2568a



Penguji I

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 68663dcc53608



Penguji II

Sri Hidayati, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 6866143ea195e



Yogyakarta, 24 Juni 2025

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 686ca47ee98b0

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Anwar Prasetia

NIM 21106020021

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul Analisis Perbandingan Dosis Sumber Iridium-192 dan Cobalt-60 Pada Brakiterapi Kanker Serviks Berbasis Monte Carlo N Particle (MCNP-6) 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, 28 Mei 2025

Penulis



Muhammad Anwar Prasetia

NIM. 21106020021



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 : MUHAMMAD ANWAR PRASETIA
NIM : 21106020021
Judul Skripsi : Analisis Perbandingan Dosis Sumber Iridium-192 dan Cobalt-60 Pada
Brakiterapi Kanker Serviks Berbasis 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 mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 23 Mei 2025

Pembimbing II

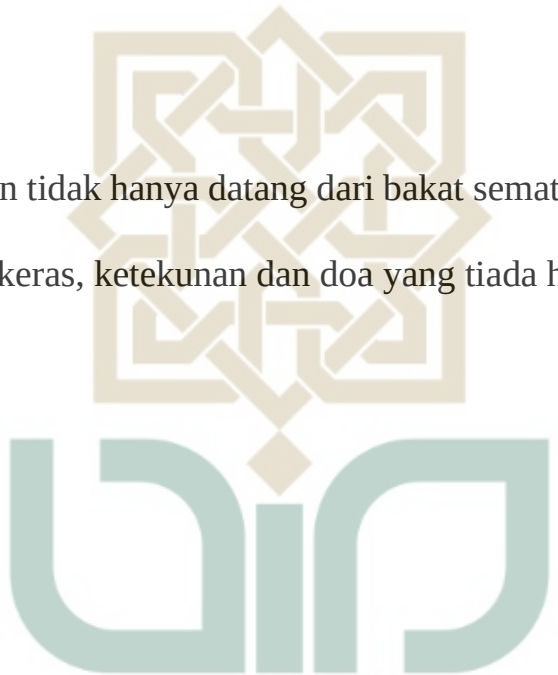
Fajar Arianto, S.Si., M.Si.
NIP. 19860801 202104 1 001

Pembimbing I

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

MOTTO

"Keberhasilan tidak hanya datang dari bakat semata, tetapi dari kerja keras, ketekunan dan doa yang tiada henti"



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya yang sederhana ini dipersembahkan oleh penulis kepada kedua orang tua,
adik, keluarga dan seluruh teman yang telah kebersamai penulis hingga titik ini
serta kepada Almamater saya Program Studi Fisika

Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga



KATA PENGANTAR

Assalaamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat, berkah, dan karunia-Nya. Berkat izin dan kekuatan dari-Nya, penulis masih diberi kesempatan dan kenikmatan dalam berbagai aspek kehidupan, serta dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul "*Analisis Perbandingan Dosis Sumber Iridium-192 dan Cobalt-60 Pada Brakiterapi Kanker Serviks Berbasis Software Monte Carlo N-Particle 6 (MCNP-6)*" sebagai bagian dari kewajiban akademik.

Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, yang menjadi teladan agung bagi seluruh umat Islam. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Sutarna dan Ibu Istiyani, orang tua tercinta, serta kedua adik, Ikhsan dan Fandi, yang selalu memberikan doa, semangat dan motivasi yang tak henti-hentinya untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Noorhaidi, S.Ag., M.A., M.Phil., Ph.D., sebagai Rektor Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Dr. Hj. Khurul Wardati, M.Si., Dekan Fakultas Sains dan Teknologi, yang telah memfasilitasi segala keperluan akademik di lingkungan fakultas.

4. Ibu Dr. Widayanti, M.Si., Ketua Program Studi Fisika, atas segala bantuannya dalam proses perkuliahan.
5. Ibu Dr. Nita Handayani, M.Si., dan Bapak Fajar Arianto, M.Si., sebagai dosen pembimbing tugas akhir, yang dengan penuh kesabaran memberikan bimbingan, nasihat, serta waktu berharga mereka. Semoga ibu dan bapak senantiasa dilimpahi kesehatan dan kebahagiaan.
6. Seluruh dosen dan tenaga pendidik di Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, yang telah mengajarkan berbagai ilmu dan pengetahuan yang sangat berharga bagi penulis.

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna dan tidak akan mungkin terselesaikan tanpa dukungan, doa, dan bantuan dari berbagai pihak. Semoga tugas akhir ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan bagi yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 8 Mei 2025

Penulis

**ANALISIS PERBANDINGAN DOSIS SUMBER IRIDIUM-192 DAN
COBALT-60 PADA BRAKITERAPI KANKER SERVIKS BERBASIS
MONTE CARLO N-PARTICLE 6 (MCNP-6)**

Muhammad Anwar Prasetia
21106020021

INTISARI

Brakiterapi adalah salah satu bentuk radioterapi internal yang dilakukan dengan menempatkan sumber radioaktif secara langsung di dalam atau dekat dengan jaringan kanker. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas antara dua jenis sumber radioaktif, yaitu Iridium-192 dan Cobalt-60 dalam aplikasi brakiterapi pada pengobatan kanker serviks stadium IIB berdasarkan jumlah *seed* dan aktivitas sumber. Simulasi dilakukan menggunakan *Monte Carlo N-Particle 6* (MCNP-6) dengan pemodelan geometri organ berdasarkan phantom wanita dewasa ORNL-MIRD. Variasi yang dilakukan meliputi penambahan jumlah *seed* dari 50 hingga 100 buah dengan interval 10 *seed* yang ditempatkan secara simetris menjauhi pusat organ serviks, serta variasi aktivitas masing-masing sumber radioisotop. Aktivitas sumber Iridium-192 divariasikan mulai dari 0,1 mCi hingga 0,9 mCi dengan interval 0,2 mCi, sedangkan untuk Cobalt-60, aktivitas berkisar antara 0,01 mCi hingga 0,09 mCi dengan interval 0,02 mCi. Hasil simulasi menggunakan *software* MCNP-6 menunjukkan bahwa semakin tinggi jumlah *seed* dan aktivitas sumber yang digunakan, semakin besar pula dosis serap yang diterima oleh organ serviks. Kombinasi ideal untuk mencapai distribusi dosis optimal pada organ target diperoleh dari penggunaan 50 *seed* Iridium-192 dengan aktivitas 0,1 mCi dan 80 *seed* Cobalt-60 dengan aktivitas 0,01 mCi. Iridium-192 cenderung memberikan distribusi dosis yang lebih terfokus pada serviks dengan paparan minimal terhadap *organ at risk*, dibandingkan dengan Cobalt-60 yang menghasilkan sebaran dosis yang lebih luas. Oleh karena itu, Iridium-192 dinilai lebih efektif untuk aplikasi brakiterapi pada kasus kanker serviks stadium IIB.

Kata kunci: Kanker serviks, brakiterapi, MCNP-6, Iridium-192, Cobalt-60

**COMPARATIVE ANALYSIS OF IRIIDIUM-192 SOURCE DOSE AND COBALT-60
IN CERVICAL CANCER BRACHYTHERAPY BASED ON
MONTE CARLO N-PARTICLE 6 (MCNP-6)**

Muhammad Anwar Prasetia
21106020021

ABSTRACT

Brachytherapy is a form of internal radiotherapy performed by placing radioactive sources directly in or close to cancerous tissue. This study aims to compare the effectiveness between two types of radioactive sources, namely Iridium-192 and Cobalt-60 in the application of brachytherapy in the treatment of stage IIB cervical cancer based on the number of seeds and source activity. Simulations were conducted using Monte Carlo N-Particle 6 (MCNP-6) with organ geometry modeling based on ORNL-MIRD adult female phantom. Variations made include increasing the number of seeds from 50 to 100 pieces with an interval of 10 seeds placed symmetrically away from the center of the cervical organ, as well as variations in the activity of each radioisotope source. The activity of the Iridium-192 source was varied from 0.1 mCi to 0.9 mCi with an interval of 0.2 mCi, while for Cobalt-60, the activity ranged from 0.01 mCi to 0.09 mCi with an interval of 0.02 mCi. Simulation results using MCNP-6 software show that the higher the number of seeds and source activities used, the greater the absorbed dose received by the cervical organs. The ideal combination to achieve optimal dose distribution in the target organ is obtained from the use of 50 Iridium-192 seeds with an activity of 0.1 mCi and 80 Cobalt-60 seeds with an activity of 0.01 mCi. Iridium-192 tends to provide a more focused dose distribution to the cervix with minimal exposure to organs at risk, compared to Cobalt-60 which produces a wider dose distribution. Therefore, Iridium-192 is considered more effective for brachytherapy applications in stage IIB cervical cancer cases.

Keywords: *cervical cancer, brachytherapy, MCNP-6, Iridium-192, Cobalt-60*

DAFTAR ISI

PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI.....	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
INTISARI.....	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMBANG DAN ISTILAH	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Penelitian	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Studi Pustaka.....	9
2.2 Landasan Teori.....	14
2.2.1 Kanker.....	14
2.2.2 Kanker Serviks.....	19
2.2.3 Radioterapi.....	22
2.2.4 Brakiterapi Serviks.....	25
2.2.5 Interaksi Radiasi Foton dengan Materi.....	27
2.2.6 Interaksi Radiasi Foton dengan Sel Tubuh.....	31
2.2.7 Dosimetri Radiasi.....	34
2.2.8 Sumber Radioisotop.....	39
2.2.8.1 Iridium-192.....	39
2.2.8.2 Cobalt-60.....	41
2.2.9 Monte Carlo N-Parcticle (MCNP).....	42
BAB III METODE PENELITIAN.....	45

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	45
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	45
3.2.1 Alat Penelitian.....	45
3.2.2 Bahan Penelitian	46
3.3 Prosedur Penelitian.....	47
3.3.1 Pembuatan Kode <i>Input</i> Program	48
3.3.2 Desain <i>Seed</i> dan Geometri Organ	50
3.3.3 Verifikasi Desain.....	51
3.3.4 Running MCNP-6.....	51
3.3.5 Output MCNP-6.....	52
3.3.6 Visualisasi Program	52
3.3.7 Perhitungan Dosis Serap.....	52
3.4 Metode Analisa Data	54
3.4.1 Analisis Perhitungan Dosis Serap Optimal	54
3.4.2 Analisis Jumlah <i>Seed</i> Ideal.....	55
3.4.3 Analisis Efektivitas Variasi Aktivitas Sumber	55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	56
4.1 Desain <i>Seed</i>	56
4.1.1 Desain <i>Seed</i> Iridium-192	56
4.1.2. Desain <i>Seed</i> Cobalt-60	56
4.1.3 Tata Letak <i>Seed</i>	58
4.1.4 Model Geometri Organ.....	58
4.1.5 Desain Proses Radiasi.....	60
4.2 Output Energi Deposisi	61
4.3 Perhitungan Dosis Serap.....	64
4.4.1 Perhitungan Dosis Serap Iridium-192.....	64
4.4.2 Perhitungan Dosis Serap Cobalt-60.....	69
BAB V PENUTUP.....	74
5.1 Kesimpulan.....	74
5.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	76
LAMPIRAN.....	80

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka.....	13
Tabel 3.1 Bahan Penelitian	46
Tabel 3.2 Jenis <i>tally</i> pada data card pada MCNP-6 (Purwaningsih, 2013).....	50
Tabel 4.1 Energi deposisi Iridium-192 dalam satuan MeV/trans.....	62
Tabel 4.2 Energi deposisi Cobalt-60 dalam satuan MeV/trans	62
Tabel 4.3 Dosis serap Iridium-192 dengan jumlah 50 <i>seed</i> dalam satuan Gy	64
Tabel 4.4 Dosis serap Iridium-192 dengan jumlah 60 <i>seed</i> dalam satuan Gy	65
Tabel 4.5 Dosis serap Iridium-192 dengan jumlah 70 <i>seed</i> dalam satuan Gy	66
Tabel 4.6 Dosis serap Iridium-192 dengan jumlah 80 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	66
Tabel 4.7 Dosis serap Iridium-192 dengan jumlah 90 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	67
Tabel 4.8 Dosis serap Iridium-192 dengan jumlah 100 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	67
Tabel 4.9 Dosis serap Cobalt-60 dengan jumlah 50 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	69
Tabel 4.10 Dosis serap Cobalt-60 dengan jumlah 60 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	70
Tabel 4.11 Dosis serap Cobalt-60 dengan jumlah 70 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	70
Tabel 4.12 Dosis serap Cobalt-60 dengan jumlah 80 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	71
Tabel 4.13 Dosis serap Cobalt-60 dengan jumlah 90 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	71
Tabel 4.14 Dosis serap Cobalt-60 dengan jumlah 100 <i>seed</i> dalam satuan Gy.....	72

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Anatomi serviks (CCRA, 2019)	20
Gambar 2.2 Ilustrasi kanker serviks (NCCN, 2024).....	22
Gambar 2.3 Prosedur brakiterapi serviks (NCCN, 2024).....	27
Gambar 2.4 Proses efek fotolistrik (Alatas dkk, 2022).....	29
Gambar 2.5 Proses terjadi Hamburan Compton (Alatas dkk, 2016)	29
Gambar 2.6 Proses terjadi Produksi Pasangan (Alatas dkk, 2016).....	31
Gambar 2.7 Skema Peluruhan Iridium-192 (Shetty dkk, 2018)	40
Gambar 2.8 Skema Peluruhan Cobalt-60 (Shetty dkk, 2018).....	41
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	47
Gambar 3.2 Model 81-01 sumber Iridium-192 (Tsao dkk, 2007)	50
Gambar 3.3 Model 6711 sumber Cobalt-60 (Badry dkk, 2018).....	51
Gambar 4.1 Desain <i>seed</i> Iridium-192.....	57
Gambar 4.2 Desain <i>seed</i> Cobalt-60	57
Gambar 4.3 Tata Letak <i>Seed</i> dari sumber Iridium-192 dan Cobalt-60.....	58
Gambar 4.4 Model Geometri Organ Serviks dan OAR dalam bentuk 3D	59
Gambar 4.5 Radiasi <i>seed</i> pada organ serviks.....	61
Gambar 4.6 Hubungan jumlah <i>seed</i> dengan energi deposisi pada Iridium-192	63
Gambar 4.7 Hubungan jumlah <i>seed</i> dengan energi deposisi pada Cobalt-60	63
Gambar 4.8 Hubungan aktivitas sumber Iridium-192 dengan dosis serap organ	68
Gambar 4.9 Hubungan aktivitas sumber Cobalt-60 dengan dosis serap organ	73

DAFTAR LAMBANG DAN ISTILAH

<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
Gy	Gray
h	Konstanta Planck
m	Massa organ
ρ	Densitas organ
τ	Umur hidup rata-rata radiosotop
$T_{1/2}$	Waktu paruh radioisotop
λ	Konstanta peluruhan
trans	Tranformasi
Us	Total transformasi
ν	Frekuensi
V	Volume organ
<u>Singkatan</u>	<u>Arti</u>
AAPM TG	American Association of Physicists in Medicine Task Group
ASCO	American Society of Clinical Oncology
CT	Computed Tomography
DNA	Deoxyribonucleic Acid
GCO	Global Cancer Observatory
HDR	High Dose Rate
HIV	Human Immunodeficiency Virus
HPV	Human Pappiloma Virus
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICRP	International Comission on Radiological Protection
LANL	Los Alamos National Laboratory
LDR	Low Dose Rate
MCNP	Monte Carlo N Particle
MDR	Medium Dose Rate

MIRD	Medical Internal Radiation Dose
MRI	Magnetic Resonance Imaging
NCCN	National Comprehensive Cancer Network
OAR	Organ at Risk
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PET	Positron Emission Tomography
RAD	Radiation Absorbed Dose
RAKR	Reference Air Kerma Rate
RSICC	Radiation Safety Information Computational Center
TPS	Treatment Planning System
WHO	World Health Organization



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
 YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kanker adalah suatu penyakit karena adanya perkembangan sel yang lebih cepat dan abnormal berasal dari sel jaringan tubuh yang berubah menjadi sel kanker. Berdasarkan data *Global Cancer Observatory* pada tahun 2022, terdapat 19 juta penderita kanker dan 9,7 juta diantaranya mengalami kematian. Data tersebut menunjukkan bahwa kanker menjadi salah satu penyebab kematian di dunia. Secara global kanker menduduki peringkat ketiga setelah serangan jantung dan *stroke* dalam kasus kematian. Kanker bisa menyerang hampir semua organ tubuh dan terdiri dari berbagai jenis yang ditentukan berdasarkan lokasi pertumbuhan sel kanker, seperti kanker payudara, kanker serviks, kanker paru-paru, kanker hati, dan lain sebagainya.

Prevalensi kasus kanker di Indonesia sebanyak 396.914 kasus dengan kasus kematian hingga 234.511 orang. Kanker payudara menjadi kanker yang paling sering diderita oleh perempuan sebanyak 65.858 kasus dan kanker serviks menjadi urutan kedua sebanyak 36.633 kasus (GLOBOCAN, 2022). Kanker serviks menempati peringkat ke empat di dunia. Secara global diperkirakan sekitar 604.000 wanita terkena kanker serviks dan diantaranya sebanyak 342.000 wanita meninggal dunia karena kanker serviks (Sung dkk, 2021).

Kanker serviks adalah tumor ganas yang berada di leher rahim karena adanya pertumbuhan yang tidak normal pada jaringan epitel serviks. Penyebab utama dari kanker serviks yaitu *Human Pappiloma Virus* (Evriarti, 2019). HPV bukan menjadi

satu-satunya penyebab yang cukup untuk kanker serviks, terdapat beberapa jenis onkogenik lainnya yang diklasifikasikan sebagai kelompok karsinogen oleh *International Agency for Research on Cancer Monographs*. Faktor lainnya seperti infeksi menular seksual (*HIV dan chlamydia trachomatis*), jumlah persalinan yang lebih tinggi, merokok dan lama penggunaan kontrasepsi oral jangka panjang (Sung dkk, 2021).

Dalam ajaran Islam, penyakit yang dialami oleh seorang Muslim dianggap sebagai ujian yang diberikan oleh Allah SWT untuk menguji kesabaran dan ketahanan iman mereka. Dalam menghadapi penyakit, mereka yang sedang sakit dianjurkan untuk berdoa dengan sungguh-sungguh dan berusaha mencari cara penyembuhan melalui berbagai upaya medis dan pengobatan yang ada. Umat muslim meyakini bahwa setiap ujian yang mereka alami termasuk penyakit merupakan bagian dari takdir yang ditentukan oleh Allah SWT yang memiliki kuasa mutlak untuk memberikan kesembuhan kepada hamba-Nya.

Dari sahabat Jabir bin Abdillah RA, bahwasannya Nabi Muhammad SAW bersabda :

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

لكل داء دواء فإذا أصيب دواء الداء برأ بإذن الله

Artinya : "Setiap penyakit ada obatnya. Apabila ditemukan obat yang tepat untuk suatu penyakit, maka akan sembuhlah penyakit itu dengan izin Allah" (HR. Muslim 4084).

Hadits tersebut mengajarkan kita bahwa penyakit itu merupakan takdir dari Allah, tetapi Allah juga menurunkan obat atau penyembuhan bagi setiap penyakit. Hal ini mengandung makna bahwa dalam setiap penyakit, Allah telah menciptakan

solusi atau obatnya. Prinsip ini juga memberikan dorongan kepada umat Islam untuk berusaha mencari pengobatan dan tidak menyerah pada kondisi penyakit. Pengobatan konvensional seperti pembedahan, kemoterapi, radioterapi, dan terapi lainnya adalah sebagian dari usaha manusia untuk mencari penyembuhan sesuai dengan prinsip ikhtiar dalam Islam (Fujianti, 2021).

Seiring meningkatnya jumlah penderita kanker baru, maka semakin meningkat juga kebutuhan pengobatannya. Terdapat tiga jenis metode utama pengobatan kanker, yaitu dengan melakukan pembedahan, kemoterapi dan radioterapi. Penderita kanker dapat melakukan terapi atau pengobatan salah satunya dengan menggunakan radiasi sinar gamma yang dipancarkan oleh inti zat radioaktif dan diarahkan atau ditembakkan ke jaringan kanker atau tumornya, pengobatan tersebut biasa disebut dengan radioterapi. Pada saat ini, radioterapi menjadi salah satu pengobatan yang banyak digunakan untuk mengobati penyakit kanker karena efektifitasnya.

Radioterapi secara umum dikelompokkan menjadi dua, yaitu radioterapi dengan sumber eksternal dan internal. Radioterapi eksternal merupakan metode terapi dengan cara penyinaran jarak jauh, sementara radioterapi internal atau yang sering disebut dengan brakiterapi merupakan metode terapi yang dilakukan dengan memasukkan sumber radioaktif ke area yang dekat dengan target atau sel kanker secara permanen atau temporer (Susilo dkk, 2019). Berdasarkan jenis sumber radiasinya pada brakiterapi dapat dikelompokkan menjadi permanen dan temporer. Sumber radiasi permanen diimplantasi ke dalam tumor, sedangkan sumber radiasi temporer diimplantasi ke dalam tumor kemudian dilepaskan lagi.

Brakiterapi terdiri dari tiga jenis yaitu brakiterapi LDR (*low dose rate*), MDR (*medium dose rate*) dan HDR (*high dose rate*). Brakiterapi LDR menggunakan laju dosis yang rendah berkisar 0,4-2 Gy/jam, brakiterapi MDR menggunakan laju dosis sedang 2-12 Gy/jam dan brakiterapi HDR yaitu menggunakan laju dosis yang tinggi >12 Gy/jam dengan sumber radioaktif yang ditempatkan sementara di dalam tumor selama beberapa menit, dan kemudian diangkat (BAPETEN, 2002). Program jaminan kualitas untuk instalasi radioterapi dalam brakiterapi harus mempertimbangkan situasi klinis setempat, ketersediaan staf dan jumlah pasien. Sehingga sumber pada LDR, MDR dan HDR perlu diperhatikan, khususnya pada *reference air kerma rate* (BAPETEN, 2002).

Dalam kasus kanker serviks sendiri menggunakan beberapa sumber radioaktif untuk brakiterapi. Sumber radioaktif yang digunakan dalam brakiterapi yaitu sumber radioaktif yang memiliki energi tinggi dan memiliki waktu paruh yang pendek maupun waktu paruh yang panjang. Sumber radioaktif tersebut dapat meluruh dan dikeluarkan dari tubuh pasien kanker melalui keringat atau sistem ekskresi lainnya (Matius, 2022). Sebelum menggunakan sumber radioaktif, perlu dilakukan perhitungan distribusi dosis serap pada jaringan tubuh yang terkena radiasi. Hasil dari perhitungan tersebut penting untuk memastikan umur sumber, jumlah dan aktivitasnya sesuai dengan kebutuhan atau persyaratan pengobatan. Setiap jenis sumber radioaktif dalam brakiterapi harus disertai data parameter distribusi dosis serap yang mengikuti protokol AAPM No. 84, yang merupakan pembaruan dari AAPM TG-43 (Purwaningsih, 2013).

Pada brakiterapi pada umumnya menggunakan sumber radioaktif yang tertutup seperti Radium-226, Cobalt-60, Cesium-137, Iodium-125 dan Iridium-192 (Susilo dkk, 2019). Pada dasarnya, sumber radiasi yang digunakan harus memenuhi standar dan lolos uji seperti uji tekanan, temperatur, getaran, dan sebagainya. Dalam brakiterapi, isotop Iridium-192 merupakan sumber radiasi yang paling umum digunakan karena memiliki waktu paruh yang singkat yaitu 74 hari dan Cobalt-60 memiliki waktu paruh yang cukup lama 5,26 tahun (Hanlon dkk, 2022).

Dosis yang aman dari sumber radioaktif untuk organ tertentu dalam brakiterapi tentunya menjadi perhatian khusus. Penentuan dosis dapat dilakukan dengan pendekatan terhadap sumber radioaktif dan bentuk sel kanker, seperti volume sel kanker divisualisasikan dalam bentuk bola. Sementara itu sumber radioaktif dianggap sebagai titik, sehingga dosis serap yang dihasilkan tidak akurat dan dibutuhkan simulasi untuk menghitung dosis serap dengan lebih tepat. Simulasi menggunakan metode *Monte Carlo* menjadi salah satu program yang dapat digunakan untuk mensimulasikan perhitungan dosis, variasi dosis, dan fungsi distribusi dosis dalam brakiterapi. Pada saat ini, telah banyak penelitian tentang simulasi brakiterapi suatu kanker dengan beberapa sumber radioaktif yang dilakukan menggunakan metode *Monte Carlo*.

Penelitian yang telah dilakukan menggunakan metode *Monte Carlo* seperti yang telah dilakukan oleh Munggara (2024) perhitungan dosis yang diserap dari sumber Paladium-103 dan Cesium-131 dalam simulasi brakiterapi kanker prostat menggunakan *software* MCNP. Adapun yang dilakukan oleh Juara (2023) menganalisis efektivitas sumber radiasi Iodine-125, Paladium-103 dan Cesium-131

pada brakiterapi untuk paru-paru kiri menggunakan *software* MCNP. Penelitian lainnya yang serupa menggunakan program MCNP yang dilakukan oleh Kurniati (2021) tentang simulasi brakiterapi pada kanker serviks dengan sumber radiasi Iridium-192 dan Matius (2022) analisis perbandingan hasil simulasi dosis serap kanker payudara pada wanita dalam brakiterapi dengan Paladium-103 dan Iodine-125 menggunakan MCNP. Penelitian yang dilakukan oleh Sadeghi (2021) mengenai perbandingan waktu penyinaran dan dosimetri brakiterapi kanker serviks secara klinis. Sumber radioaktif yang digunakan untuk penelitian sangat bervariasi dan juga dalam klinis seperti rumah sakit di Indonesia telah menggunakan sumber Iridium-192 untuk brakiterapi seperti RSUP Dr. Sardjito Yogyakarta dan RSUP Fatmawati Jakarta menggunakan sumber Cobalt-60 (Sadeghi, 2021).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, belum terdapat penelitian yang menjelaskan mengenai perbandingan distribusi dosis yang optimal pada brakiterapi kanker serviks berbasis simulasi menggunakan sumber radiasi Iridium-192 dan Cobalt-60. Keakuratan dalam penentuan dosis serap untuk brakiterapi sangat penting dalam proses pengobatan. Simulasi diperlukan untuk memastikan dosis serap yang optimal (Fikr dkk, 2019). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian simulasi brakiterapi pada kanker serviks dengan sumber Iridium-192 dan Cobalt-60 menggunakan *software* MCNP-6 untuk menghitung distribusi dosis optimal pada organ serviks dan organ di sekitarnya menerima distribusi dosis yang paling rendah. Selain itu perlu dilakukan analisis jumlah *seed* yang ideal pada kedua sumber untuk tercapainya distribusi dosis optimal pada

organ serviks dan juga menganalisis perbandingan sumber radiasi yang paling efektif digunakan untuk brakiterapi pada kasus kanker serviks dari Iridium-192 dan Cobalt-60.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana simulasi brakiterapi kanker serviks dengan sumber Iridium-192 dan Cobalt-60 menggunakan *software* MCNP-6 untuk menghitung distribusi dosis pada organ serviks dan organ di sekitarnya?
2. Bagaimana pengaruh jumlah *seed* Iridium-192 dan Cobalt-60 yang ideal untuk dosis serap yang optimal pada kanker serviks menggunakan *software* MCNP-6?
3. Bagaimana pengaruh variasi aktivitas dalam sumber Iridium-192 dan Cobalt-60 pada brakiterapi kanker serviks menggunakan *software* MCNP-6?

1.3 Tujuan Penelitian

Beberapa tujuan pada penelitian ini diantaranya yaitu sebagai berikut.

1. Mensimulasikan brakiterapi pada kanker serviks dengan sumber Iridium-192 dan Cobalt-60 menggunakan *software* MCNP-6 untuk menghitung distribusi dosis pada organ serviks dan organ di sekitarnya.
2. Menganalisis jumlah *seed* yang ideal pada sumber Iridium-192 dan Cobalt-60 untuk tercapainya distribusi dosis optimal pada organ serviks.
3. Menganalisis pengaruh variasi aktivitas dalam sumber Iridium-192 dan

Cobalt-60 terhadap distribusi dosis radiasi yang paling efektif digunakan untuk brakiterapi pada kasus kanker serviks.

1.4 Batasan Penelitian

Beberapa batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kanker serviks yang disimulasikan adalah kanker serviks stadium IIB.
2. Penelitian ini memodelkan organ targetnya serviks dan *organ at risk* bladder, rectum, sigmoid.
3. Perhitungan dosis berdasarkan elemen volume setiap organ.
4. Desain organ tubuh menggunakan *standar phantom adult female* dari ORNL- MIRD.
5. Variasi jumlah *seed* mulai dari 50 buah hingga 100 buah dengan interval 10 buah.
6. Variasi aktivitas dalam sumber Iridium-192 terdiri dari 0,1 mCi ; 0,3 mCi ; 0,5 mCi ; 0,7 mCi dan 0,9 mCi.
7. Variasi aktivitas dalam sumber Cobalt-60 terdiri dari 0,01 mCi ; 0,03 mCi ; 0,05 mCi ; 0,07 mCi dan 0,09 mCi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat digunakan sebagai referensi untuk *treatment planning system* (TPS) pengobatan kanker serviks dengan teknik brakiterapi.
2. Menambah pengetahuan dan pemahaman mengenai teknik brakiterapi pada kasus kanker serviks terhadap dosis yang diterima pasien, serta mengetahui sumber radiasi yang sesuai dengan kebutuhan pengobatan kanker serviks.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Simulasi brakiterapi untuk mengetahui dosis serap pada kasus kanker serviks stadium IIB berdasarkan jumlah *seed* dan aktivitas sumber radioisotop Iridium-192 dan Cobalt-60 berhasil dilakukan menggunakan *software* MCNP-6. Organ target yang disimulasikan adalah serviks dan *organ at risk* yang disimulasikan adalah rectum, bladder dan sigmoid. Variasi yang digunakan dalam simulasi ini merupakan variasi jumlah *seed* dan aktivitas sumber.
2. Jumlah *seed* yang ideal untuk sumber Iridium-192 adalah 50 *seed* dan untuk sumber Cobalt-60 adalah 80 *seed*. Semakin banyak *seed* yang digunakan akan semakin besar dosis serap yang diterima oleh organ serviks dan *organ at risk* (OAR). Dosis serap yang diterima OAR dengan sumber Cobalt-60 lebih besar karena mampu menembus jaringan tubuh yang lebih dalam dan luas, sehingga dosis serap tidak hanya tinggi di organ target melainkan juga pada OAR.
3. Variasi aktivitas yang ideal untuk sumber Iridium-192 adalah 0,1 mCi dan untuk sumber Cobalt-60 adalah 0,01 mCi. Cobalt-60 memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan Iridium-192, sehingga pada Cobalt-60 dosis serap optimal dapat dicapai dengan aktivitas sumber yang lebih

rendah. Pengaruh penggunaan aktivitas sumber yang semakin besar akan memperbesar nilai dosis serap yang diterima oleh organ target dan OAR.

5.2 Saran

Penelitian ini menggunakan phantom wanita dewasa ORNL-MIRD pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan data citra medis nyata seperti MRI atau PET/CT pasien kanker serviks agar geometri organ yang disimulasikan lebih representatif terhadap kondisi klinis, sehingga hasil distribusi dosis lebih akurat.

Pada penelitian selanjutnya dapat menggunakan aktivitas sumber yang lebih kecil. Selain itu, juga dapat mengintegrasikan teknologi pencitraan modern seperti MRI atau PET/CT dengan sistem perencanaan pengobatan untuk meningkatkan akurasi penentuan dosis serap. Hal ini dapat membantu dalam memvisualisasikan distribusi dosis secara lebih detail dan memastikan bahwa target tumor menerima dosis yang tepat sementara jaringan sehat terlindung.

DAFTAR PUSTAKA

- Alatas, Z. M., Hidayati, S., Akhadi, M., Maryati, P., Purwadi, D., Ariyanto, S., Winarno, H., Rismayanto, Sofyatiningrum, E., Hendriyanto, H., Widyastono, H., Parmanto, E. M., & Syahri. 2016. *Buku Pintar Nuklir*. Jakarta: BATAN Press.
- Badry, H., Oufni, L., Ouabi, H., & Hirayama, H. 2018. A Monte Carlo investigation of the dose distribution for ^{60}Co high dose rate brachytherapy source in water and in different media. *Applied Radiation and Isotopes*, **136**, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.02.016>.
- Bhatla, N., Berek, J. S., Cuello, F., Denny, L. A., Grenman, S., Karunaratne, K., & Ngan, H. Y. S. 2019. Revised FIGO staging for carcinoma of the cervix uteri. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, **145(1)**, 129–135.
- BAPETEN. 2002. BAPETEN's Chairman Decree Number 21/Ka-BAPETEN/XII-02 on Quality Assurance Program Installation Radiotherapy.
- Beiser, A. 2003. *Concepts of Modern Physics; Chapter 12 :Nuclear Transformations*. Boston: Macgraw-Hill.
- Benedict, S. H. 2004. Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, **5(3)**, – 92. <https://doi.org/10.1120/jacmp.2021.25315>.
- Canadian Cancer Research Alliance. 2019. *Understanding Cancer: What is Cancer and Types of Cancer*. 1–6. <https://www.ccra-acrc.ca/wp-content/uploads/2020/08/Understanding-Cancer-What-is-Cancer-and-Types-of-Cancer.pdf>. Diakses September 2024.
- Cember, H. 1983. *Introduction to Health Physics, Chapter 6*. Pergamon Press, New York.
- Evriarti, A. Y. 2019. Patogenesis Human Papillomavirus (HPV) pada Kanker Serviks. *Jurnal Biotek Medisiana Indonesia*, **8.1**, 23–32.
- Fardela, R., Analia, R., Maulida, A., Ramda Rena, S., Diyona, F., & Mardiansyah, D. 2023. Verifikasi Sumber Brakiterapi HDR Ir-192 Menggunakan Detektor Ionisasi Well Type Chamber di Rumah Sakit Universitas Andalas. *Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, **20(2)**, 2541–1713. <https://doi.org/10.20527/16727>.
- 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.

- Fitriatuzzakiyyah, N., Sinuraya, R. K., & Puspitasari, I. M. 2017. Cancer Therapy with Radiation: The Basic Concept of Radiotherapy and Its Development in Indonesia. *Indonesian Journal of Clinical Pharmacy*, **6(4)**, 311–320. <https://doi.org/10.15416/ijcp.2017.6.4.311>.
- Fujianti, D., Daffa, M., & Darmalaksana, W. 2021. Takhrij and Syarah Hadith on Chemistry: Islamic Perspective on Chemical-Based Medicines. *Gunung Djati Conference Series*, 41–49.
- Global Cancer Observatory. 2022. *International Agency for Research on Cancer*. Diakses 10 September 2024 dari 360-indonesia-fact-sheets.pdf (iarc.fr).
- Hanlon, M. D., Smith, R. L., dan Franich, R. D. 2022. MaxiCalc: A tool for online dosimetric evaluation of source-tracking based treatment verification in HDR brachytherapy. *Physica Medica*, **94**, 58–64.
- Juari, S., Arman, Y., Nurhasanah, Arianto, F. 2023. Analisis Efektivitas Sumber Radiasi pada Brakiterapi Paru-paru Kiri berdasarkan Jumlah *Seed* menggunakan Simulasi Monte Carlo. *Jurnal Fisika Unand (JFU)* **Vol. 12, No. 2**, April 2023, hal. 275 – 281 <https://doi.org/10.25077/jfu.12.2.275-281.2023>.
- Kasmudin, 2015. Simulasi Dosis Serap Radial Sumber Iridium-192 Untuk Brakiterapi dengan Menggunakan MCNP, *Prosiding Seminar Nasional XI SDM Teknologi Nuklir Tahun 2015 (SDMTN 2015)*, ISSN 1978-0176.
- Khabibah, U., Adyani, K., & Rahmawati, A. 2022. Faktor Risiko Kanker Serviks: Literature Review. *Faletehan Health Journal*, **9(3)**, 270–277. <https://doi.org/10.33746/fhj.v10i03.354>.
- Kurniati, F., Krisna, F. P., Junios, & Haryanto, F. 2021. The Dose Distribution from Iridium-192 Source on Cervical Cancer Brachytherapy by Manchester System Using Monte Carlo Simulation. *Atom Indonesia*, **47(3)**, 205–211. <https://doi.org/10.17146/aij.2021.1102>.
- Knoll, G. F. 2010. *Radiation Detection and Measurement*, 4th Edition. Wiley.
- Larasati, C. A., Haryadi, A., -, W., & Kurniasari, E. 2023. Penentuan distribusi dosis serap target volume kanker serviks pada radioterapi Cobalt-60 berbasis Monte Carlo. *Jurnal Teras Fisika*, **6(1)**, 1. <https://doi.org/10.20884/1.jtf.2023.6.1.6558>.

- Matius, M. L. T. (2022). Analisis perbandingan hasil simulasi dosis serap kanker payudara pada wanita dalam brakiterapi dengan Pd-103 dan I-125 menggunakan MCNP. *Jurnal Neo Teknika*, **10(2)**, 134–141. <https://doi.org/10.56378/jnt.v10i2.1785>
- Munggara, M. R., Handayani, N., & Arianto, F. 2024. Calculation of Absorbed Dose of ^{103}Pd and ^{131}Cs Sources in Prostate Cancer Brachytherapy Simulation Using Monte Carlo N-Particle 6 (MCNP-6) Software. *6th International Conference on Science and Engineering (ICSE)*, **6**, 135–144.
- Nath, R., Anderson, L. L., Luxton, G., Weaver, K. A., Williamson, J. F., & Meigooni, A. S. 1995. Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43. *Medical Physics*, **22(2)**, 209–234. <https://doi.org/10.1118/1.597458>.
- National Comprehensive Cancer Network 2022. *NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology: Cervical Cancer Evidence Blocks*. https://www.nccn.org/professionals/physician_gls/pdf/cervical_blocks.pdf. – Diakses September 2024.
- Nurhayati, N., & Mulyaningsih, N. N. 2020. Penerapan Radioterapi Pada Pengobatan Kanker Payudara. *Schrodinger Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pendidikan Fisika*, **1(2)**, 88–94. <https://doi.org/10.30998/sch.v1i2.3137>.
- 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.
- Podgorsak, E. B. 2005. *Radiation Oncology Physics: Handbook for Teacher and Students*. IAEA, Vienna.
- Pandiangan, T., & Bali, I. 2021. Analisis Dosis Radiasi Pada Jaringan Tumor Dengan Simulasi Program Mcnp-5. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran Dan Ilmu Kesehatan*, **5(2)**, 341.
- Richter, Luis Egon; Carlos Augusto; Beber, D. M. 2022. *Handbook of Radiotherapy Physics Second Edition (Second)*. CRC Press.
- Rahastama, S., Mayantasari, M., Wulandari, T., & Salim, R. 2023. Radiation Dose Analysis in the Cervix Area by Cobalt-60 Irradiation Using the Monte Carlo Method. *Atlantis Press International BV*.
- Sadeghi, M.H., Sina, S., Meigooni, A.S. 2020. A comparison of treatment duration for Cobalt-60 and Iridium192 sources with different activities in HDR brachytherapy using tandem-ovoid applicator. *Iran J Med Phys*, **Vol. 18, No. 5**.

- Safgholi, H., Meigooni, AS., Song, WY. 2017. Comparison of (192) Ir, (169) Yb, and (60) Co high-dose rate brachytherapy sources for skin cancer treatment. *Med Phys.* **44(9)**:4426–36.
- Shetty, N., Olsovcova, V., & Versaci, R. 2018. Sensitivity of Ambient Dose Equivalent to the Concentration of Cobalt Impurity Present in Stainless Steel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1046(1).
- Shukla, A. K., Jangid, P. K., Rajpurohit, V. S., Verma, A., Dangayach, S. K., Gagrani, V., Rathore, N. K. 2019. Dosimetric comparison of 60Co and 192Ir high dose rate source used in brachytherapy treatment of cervical cancer. *J Can Res Ther* 2019;**15**:1212-5. DOI: 10.4103/jcrt.JCRT_372_19.
- Sriyono, S. 2019. Fraksi Aktivitas Produk dan Teoritis bagi 192Ir Sebagai Sumber Radiasi Mikro-Kapsul Brakiterapi. *JC-T (Journal Cis-Trans): Jurnal Kimia Dan Terapannya*, **3(2)**, 7–11. <https://doi.org/10.17977/um0260v3i22019p007>.
- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., dan Bray, F. 2021. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, **71(3)**, 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>.
- Susilo, N.Y., Indrati, R., dan Sulaksono, N. 2019. Tata Laksana Brakiterapi Co-60 Teknik Intrakaviter Lengkap pada Kasus Kanker Serviks. *Jurnal Radiografer Indonesia*, **Vol. 2 No. 2**: November 2019, p-ISSN: 2620-9950.
- Wen, A., Wang, X., Wang, B., Yan, C., Luo, J., Wang, P., & Li, J. 2022. Radiobiological and dosimetric comparison of 60Co versus 192Ir high-dose- rate intracavitary-interstitial brachytherapy for cervical cancer. *Radiation Oncology*, **17(1)**, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13014-022-02170-8>.
- World Health Organization. 2019. Human Papillomavirus (HPV) and Cervical Cancer. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cervicalcancer>. Diakses Desember 2024.
- 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**.
- Yayasan kanker Indonesia. 2018. Harapan Terpadu World cancer Day 2018. *Buletin YKI*, **2(April)**, 1-54.