

**ANALISIS VARIASI MATERIAL *SHIELDING* UNTUK
SISTEM TERAPI PROTON BERBASIS METODE
MONTE CARLO
TUGAS AKHIR**

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



diajukan oleh:

Widha Putrie Saharani
21106020038

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2025**



PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-190/Un.02/DST/PP.00.9/01/2025

Tugas Akhir dengan judul : Analisis Variasi Material Shielding Untuk Sistem Terapi Proton Berbasis Metode Monte Carlo

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : WIDHA PUTRIE SAHARANI
Nomor Induk Mahasiswa : 21106020038
Telah diujikan pada : Rabu, 15 Januari 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: 679ae397bd76c



Penguji I

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

Valid ID: 6795c1b51e64b



Penguji II

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

Valid ID: 6799f5589b928



Yogyakarta, 15 Januari 2025

UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 679b34ed684ef

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Widha Putrie Saharani

NIM : 21106020038

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Analisis Variasi Material *Shielding* Untuk Sistem Terapi Proton Berbasis Metode *Monte Carlo*” 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, 13 Januari 2025

Penulis



Widha Putrie Saharani

NIM. 21106020038



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 : Widha Putri Saharani
NIM : 21106020038
Judul Skripsi : Analisis Variasi Material *Shielding* Untuk Sistem Terapi Proton Berbasis Metode *Monte Carlo*

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.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 7 Januari 2025

Pembimbing II

Pembimbing I

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

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

ANALISIS VARIASI MATERIAL *SHIELDING* UNTUK SISTEM TERAPI PROTON BERBASIS METODE *MONTE CARLO*

Widha Putrie Saharani
21106020038

INTISARI

Terapi proton merupakan salah satu radioterapi menggunakan partikel proton berenergi tinggi. Produksi partikel proton berenergi tinggi akan menghasilkan partikel kontaminan seperti neutron. Partikel neutron berbahaya bagi masyarakat dan pekerja radiasi karena memiliki nilai *Linear Energy Transfer* (LET) yang tinggi. Oleh karena itu, diperlukan upaya proteksi radiasi berupa penggunaan *shielding*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas variasi material *shielding* dalam terapi proton berbasis simulasi menggunakan *software* PHITS. Simulasi dilakukan dengan memodelkan ruangan terapi proton yang terdiri dari dinding depan, belakang, kanan, kiri dari ruangan *cyclotron* dan ruangan *beam transport system*. Variasi material yang diuji meliputi aluminium, besi, BPE, *concrete*, dan tungsten dengan ketebalan yang sesuai dengan standar IAEA. Energi proton yang digunakan divariasikan pada rentang 70 MeV hingga 230 MeV dengan interval 40 MeV untuk menggambarkan kondisi klinis yang berbeda. Batas nilai laju dosis yang sesuai dengan Perka BAPETEN No. 3 Tahun 2013 yaitu sebesar $2,5 \times 10^{-4}$ mSv/jam. Berdasarkan hasil analisis data, dapat diketahui bahwa material yang mampu menyerap radiasi neutron secara optimal adalah material *concrete* dan tungsten. Pemilihan *concrete* sebagai material *shielding* membutuhkan *cost* yang lebih sedikit dibandingkan dengan tungsten. Namun, *concrete* memiliki titik leleh yang lebih rendah, sehingga membutuhkan perawatan dan pengecekan berkala. Titik leleh yang rendah ini mempengaruhi masa ketahanan material *concrete*. Di sisi lain, tungsten membutuhkan *cost* yang cukup tinggi namun tungsten memiliki titik leleh yang paling tinggi. Hal ini mengakibatkan tungsten tidak membutuhkan manajemen perawatan yang kompleks dan memiliki masa ketahanan yang lebih panjang.

Kata kunci: terapi proton, *shielding*, PHITS, radiasi, material

ANALYSIS OF SHIELDING MATERIAL VARIATIONS FOR A PROTON THERAPY SYSTEM USING THE MONTE CARLO METHOD

Widha Putrie Saharani
21106020038

ABSTRACT

Proton therapy is one of the radiotherapies using high-energy proton particles. The production of high-energy proton particles will produce contaminant particles such as neutrons. Neutron particles are harmful because they have a high Linear Energy Transfers (LET) value. Therefore, radiation protection efforts are needed in the form of the use of shielding. This study aims to analyze the effectiveness of shielding material variations in simulation-based proton therapy using PHITS software. The simulation was carried out by modeling a proton therapy room consisting of the front, back, right, and left walls of the cyclotron room and the beam transport system room. The variety of materials includes aluminum, iron, BPE, concrete, and tungsten with thicknesses that comply with IAEA standards. The proton energy used is varied in the range of 70 MeV to 230 MeV at 40 MeV intervals to describe different clinical conditions. The limit of the dose rate value in accordance with Regulation of the Head of the Nuclear Energy Supervisory Agency No. 3 of 2013 is as follows $2,5 \times 10^{-4}$ mSv/hour. Based on the results of data analysis, it can be found that materials that are able to absorb neutron radiation optimally are concrete and tungsten materials. The use of concrete materials as shielding is more efficient because the cost required is less, while tungsten materials have better effectiveness in absorbing radiation, especially neutron radiation. The selection of concrete as a shielding material requires lower costs compared to tungsten. However, concrete has a lower melting point, necessitating regular maintenance and inspection. This low melting point affects the durability of concrete as a material. On the other hand, tungsten entails significantly higher costs but has the highest melting point. Consequently, tungsten does not require complex maintenance management and offers a longer lifespan.

Keywords: proton therapy, shielding, PHITS, radiation, materials

MOTTO

“Jika Anda memiliki dua kesempatan, pilih salah satu yang paling membuat
Anda takut, karena itu akan membuat Anda tumbuh”



HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini penulis persembahkan untuk kedua orang tua, adik serta keluarga besar yang senantiasa kebersamai dan mendukung penulis hingga saat ini.

Terima kasih dan semoga bermanfaat.



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan ke hadirat Allah SWT. yang senantiasa melimpahkan rahmat, karunia, kesempatan, dan kelancaran-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “Analisis Variasi Material *Shielding* Untuk Sistem Terapi Proton Berbasis Metode *Monte Carlo*”. Tugas Akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sedalam-dalamnya atas bimbingan, dukungan, arahan, masukan dan saran yang telah diberikan selama penyusunan laporan kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa mendukung setiap proses penulis dalam perjalanan meraih gelar S-1 termasuk dalam pelaksanaan penelitian hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika.
3. Ibu Dr. Nita Handayani S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan, arahan serta motivasi yang diberikan kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Fajar Arianto, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan, arahan serta motivasi yang diberikan kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh Bapak Ibu Dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu serta pengalaman kepada penulis.

6. Program Studi Fisika Universitas Diponegoro yang telah berkolaborasi dengan Fisika UIN Sunan Kalijaga sehingga penulis bisa melaksanakan penelitian ini.
7. Teman-teman anggota grup “KAPAL API” yang telah kebersamai penulis dalam suka dan duka selama menjalani perkuliahan.
8. Teman-teman Fisika angkatan 2021 yang telah kebersamai penulis dalam menjalani perkuliahan.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sampaikan satu per satu yang telah memberikan *support* sehingga Tugas Akhir ini terselesaikan.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih banyak terdapat kekurangan dan ketidaksempurnaan. Oleh karena itu, penulis dengan senang hati menerima kritik, saran dan masukan yang bersifat membangun demi perbaikan dan kemajuan penulis dimasa yang akan datang. Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis, pembaca, dan pihak lainnya.

Yogyakarta, Desember 2024

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	iii
INTISARI	iv
ABSTRACT	v
MOTTO	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR ISTILAH	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	9
1.3 Tujuan Penelitian.....	10
1.4 Batasan Penelitian	11
1.5 Manfaat Penelitian.....	11
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	13
2.1 Studi Pustaka	13
2.2 Landasan Teori	18
2.2.1 Konsep Dasar Fisika Radiasi	18
2.2.2 Radioterapi.....	20
2.2.3 Interaksi Proton dengan Materi.....	22
2.2.4 Interaksi Neutron dengan Materi	24
2.2.5 Terapi Proton	28
2.2.6 Cyclotron	32
2.2.7 Proteksi Radiasi	33
2.2.8 Dosimetri Radiasi dalam Terapi Proton	34
2.2.9 Shielding dalam Terapi Proton	36
2.2.10 Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS).....	38
2.2.11 Nilai-nilai Islam dalam Terapi Proton	40
BAB III METODE PENELITIAN	42
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	42
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	42
3.2.1 Alat Penelitian.....	42

3.2.2	Bahan Penelitian.....	43
3.3	Tahapan Penelitian	44
3.3.1	<i>Input</i> Parameter.....	45
3.3.2	<i>Input Source</i>	45
3.3.3	<i>Input Geometry</i> Ruang <i>Cyclotron</i>	46
3.3.4	Simulasi Variasi Energi.....	47
3.3.5	Simulasi Variasi Ketebalan.....	48
3.3.6	<i>Tally</i>	48
3.3.7	<i>Running</i> PHITS.....	49
3.3.8	<i>Output</i> Desain dan <i>Flux</i>	49
3.3.9	Visualisasi Desain.....	50
3.3.10	Konversi Nilai <i>Flux</i> ke Laju Dosis	50
3.4	Metode Analisa Data	51
3.4.1	Analisis Desain Sistem <i>Shielding</i>	51
3.4.2	Analisis Simulasi Sistem <i>Shielding</i>	52
3.4.3	Analisis Nilai <i>Flux</i>	52
3.4.4	Analisis Nilai Laju Dosis dari <i>Geometry</i> Ruangan	53
3.4.5	Analisis Efektivitas Variasi Material <i>Shielding</i>	54
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1	Hasil Penelitian.....	55
4.1.1	Desain Sistem <i>Shielding</i> pada Ruangan <i>Cyclotron</i>	55
4.1.2	Simulasi Sistem <i>Shielding</i> pada Ruangan <i>Cyclotron</i>	56
4.1.2.1	Material <i>Shielding</i> Aluminium.....	56
4.1.2.2	Material <i>Shielding</i> Besi.....	59
4.1.2.3	Material <i>Shielding</i> BPE.....	62
4.1.2.4	Material <i>Shielding</i> Concrete	65
4.1.2.5	Material <i>Shielding</i> Tungsten	67
4.1.3	Nilai <i>Flux</i> Neutron pada Ruangan	69
4.1.3.1	Ruangan Tanpa <i>Shielding</i>	69
4.1.3.2	Ruangan dengan <i>Shielding</i> Aluminium	70
4.1.3.3	Ruangan dengan <i>Shielding</i> Besi.....	72
4.1.3.4	Ruangan dengan <i>Shielding</i> BPE.....	73
4.1.3.5	Ruangan dengan <i>Shielding</i> Concrete	74
4.1.3.6	Ruangan dengan <i>Shielding</i> Tungsten	76
4.1.4	Nilai Laju Dosis Neutron pada Ruangan	82
4.1.4.1	Ruangan dengan <i>Shielding</i> Aluminium	82

4.1.4.2	Ruangan dengan <i>Shielding</i> Besi.....	84
4.1.4.3	Ruangan dengan <i>Shielding</i> BPE.....	86
4.1.4.4	Ruangan dengan <i>Shielding Concrete</i>	88
4.1.4.5	Ruangan dengan <i>Shielding</i> Tungsten.....	90
4.1.5	Analisis Efektivitas Material sebagai <i>Shielding</i>	92
4.2	Integrasi-Interkoneksi.....	95
BAB V PENUTUP.....		97
5.1	Kesimpulan.....	97
5.2	Saran.....	98
DAFTAR PUSTAKA.....		99
LAMPIRAN.....		104



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka	17
Tabel 2.2 Jenis-jenis <i>tally</i>	40
Tabel 3.2 Alat penelitian	42
Tabel 3.3 <i>Database Cyclotron</i> (Tsutsui dkk, 2014)	43
Tabel 3.4 <i>Database Variasi Material</i> (Garcia-Fernandez dkk, 2020)	43
Tabel 3.5 Variasi ketebalan dinding material <i>shielding</i>	48
Tabel 4.1 Nilai <i>flux</i> neutron pada ruangan tanpa <i>shielding</i>	70
Tabel 4.2 Nilai <i>flux</i> neutron pada ruangan dengan <i>shielding</i> Aluminium.....	71
Tabel 4.3 Nilai <i>flux</i> neutron pada ruangan dengan <i>shielding</i> Besi	73
Tabel 4.4 Nilai <i>flux</i> neutron pada ruangan dengan <i>shielding</i> BPE.....	74
Tabel 4.5 Nilai <i>flux</i> neutron pada ruangan dengan <i>shielding</i> Concrete.....	75
Tabel 4.6 Nilai <i>flux</i> neutron pada ruangan dengan <i>shielding</i> Tungsten	77
Tabel 4.7 Nilai laju dosis pada ruangan dengan <i>shielding</i> Aluminium.....	82
Tabel 4.8 Nilai laju dosis pada ruangan dengan <i>shielding</i> Besi	84
Tabel 4.9 Nilai laju dosis pada ruangan dengan <i>shielding</i> BPE.....	86
Tabel 4.10 Nilai laju dosis pada ruangan dengan <i>shielding</i> Concrete.....	88
Tabel 4.11 Nilai laju dosis pada ruangan dengan <i>shielding</i> Tungsten	90

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi radiasi (Richter dkk, 2022).....	19
Gambar 2.2 Ilustrasi kerusakan SSB dan DSB (Theodorakis, 2014).....	20
Gambar 2.3 Interaksi proton dengan atom elektron (Newhauser dan Zhang, 2015).....	22
Gambar 2.4 Peristiwa pembelokan lintasan proton (Newhauser dan Zhang, 2015)	23
Gambar 2.5 Interaksi nuklir inelastis (Newhauser dan Zhang, 2015)	24
Gambar 2.6 Hamburan elastis (Cember dan Johnson, 2009)	25
Gambar 2.7 Hamburan inelastis (Cember dan Johnson, 2009)	26
Gambar 2.8 Peristiwa tangkapan radiatif (Widodo dkk, 2019).....	26
Gambar 2.9 Peristiwa spalasi (Cember dan Johnson, 2009)	27
Gambar 2.10 Reaksi fisi (Cember dan Johnson, 2009)	27
Gambar 2.11 Kurva kedalaman energi radioterapi (Taunk, 2022).....	29
Gambar 2.12 Skema ruangan terapi proton (Calvo dkk, 2023).....	29
Gambar 2.13 Rangkaian <i>cyclotron</i> (Podgorsak, 2005).....	32
Gambar 2.14 <i>Flux</i> radiasi (Wazir dkk, 2017).....	34
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	44
Gambar 4.1 Desain sistem <i>shielding</i> ruangan dalam tiga dimensi	55
Gambar 4.2 Simulasi <i>shielding</i> Aluminium	58
Gambar 4.3 Simulasi <i>shielding</i> Besi	61
Gambar 4.4 Simulasi <i>shielding</i> BPE	64
Gambar 4.5 Simulasi <i>shielding</i> Concrete	66
Gambar 4.6 Simulasi <i>shielding</i> Tungsten.....	68
Gambar 4.7 Grafik <i>flux</i> neutron ruangan tanpa <i>shielding</i>	70
Gambar 4.8 Grafik <i>flux</i> neutron ruangan dengan <i>shielding</i>	81
Gambar 4.9 Grafik laju dosis <i>shielding</i> Aluminium	83
Gambar 4.10 Grafik laju dosis <i>shielding</i> Besi.....	85
Gambar 4.11 Grafik laju dosis <i>shielding</i> BPE.....	87
Gambar 4.12 Grafik laju dosis <i>shielding</i> Concrete	89
Gambar 4.13 Grafik laju dosis <i>shielding</i> Tungsten	91

DAFTAR ISTILAH

<u>Istilah</u>	<u>Arti</u>
<i>Beam Transport System</i>	Komponen untuk memindahkan proton energi tinggi
BPE	Material <i>Borated Polyethylene</i>
<i>Bragg peak</i>	Puncak <i>peak</i> energi dalam terapi proton
<i>Concrete</i>	Material Beton
<i>Cyclotron</i>	Komponen untuk menghasilkan proton energi tinggi
<i>Flux</i>	Jumlah partikel yang mengenai area luasan medium
Laju Dosis	Jumlah dosis radiasi per satuan waktu
<i>Linear Energy Transfer</i>	Jumlah radiasi yang ditransfer ke medium
<i>Monte Carlo</i>	Metode numerik untuk menyimulasikan radiasi
Partikel Kontaminan	Partikel dihasilkan dari produksi proton
<i>Shielding</i>	Perisai radiasi dalam radioterapi
<i>Sievert</i>	Satuan laju dosis radiasi
Terapi Proton	Metode radioterapi menggunakan radiasi proton

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kanker merupakan salah satu jenis penyakit yang ditandai dengan adanya abnormalitas pertumbuhan dari sel tubuh tertentu yang tidak terkendali sehingga mengakibatkan rusaknya sel dan jaringan tubuh (Saravana, 2023). Sel kanker juga disebut dengan sel ganas dikarenakan sifatnya yang ganas dan bisa mengakibatkan kematian. Kanker juga merupakan salah satu jenis penyakit kompleks dan mempengaruhi kehidupan jutaan orang di dunia. Kompleksitas kanker dapat dilihat dari pertumbuhan dan penyebaran sel-sel abnormal yang tidak terkendali di dalam tubuh, sehingga dapat menyebabkan pembentukan tumor dan selanjutnya akan mengalami metastasis. Kanker dapat menyerang seluruh bagian tubuh serta dapat menyerang segala usia, namun risiko terserang penyakit kanker akan meningkat seiring bertambahnya usia (Saravana, 2023).

Kanker juga dapat didefinisikan sebagai gangguan yang dihasilkan dari perubahan genetik atau epigenetik dalam sel somatik (Copur, 2019). Gangguan ini berupa pertumbuhan sel secara abnormal yang dapat menyebar ke bagian tubuh lainnya kemudian membentuk subset neoplasma. Pertumbuhan sel abnormal yang disebut neoplasma atau tumor akan membentuk benjolan atau massa dan didistribusikan menyebar ke seluruh bagian tubuh (Copur, 2019).

Dalam Islam, penyakit merupakan salah satu cobaan yang datang dari Allah SWT. Sebagai umat Islam, kita wajib meyakini saat Allah menimpakan cobaan kepada kita, seperti penyakit, kesedihan, maupun cobaan lainnya, maka

tidak ada yang mampu menghilangkannya kecuali Allah. Selain itu, sebagai umat Islam juga wajib meyakini apabila Allah menghendaki kebaikan, seperti kesehatan, kesenangan, kebahagiaan, maupun kebaikan lainnya, maka tidak ada yang mampu menolak dan menghalangi kebaikan tersebut. Allah akan memberikan kebaikan kepada siapapun hambanya yang Allah kehendaki. Hal tersebut sesuai dengan firman Allah SWT dalam Q.S. Yunus/10:107 sebagai berikut:

وَأِنْ يَّمْسَسْكَ اللَّهُ بَضُرًا فَلَا كَاشِفَ لَهُ إِلَّا هُوَ وَإِنْ يُرِدْكَ بِخَيْرٍ فَلَا رَادَّ لِفَضْلِهِ يُصِيبُ بِهِ مَنْ يَشَاءُ مِنْ عِبَادِهِ
وَهُوَ الْغَفُورُ الرَّحِيمُ

Artinya: “Jika Allah menimpakan suatu mudharat kepadamu, tidak ada yang dapat menghilangkannya kecuali Dia dan jika Dia menghendaki kebaikan bagimu, tidak ada yang dapat menolak karunia-Nya. Dia memberikannya (kebaikan itu) kepada siapa yang Dia kehendaki di antara hamba-hamba-Nya. Dialah Yang Maha Pengampun lagi Maha Penyayang.”

Dalam ayat tersebut, Allah SWT menegaskan keesaan-Nya dalam menjaga hamba-Nya, hanya Allah yang memiliki kekuasaan untuk menghilangkan kesulitan atau kemudharatan yang sedang menimpa hamba-Nya, seperti penyakit, kemiskinan, maupun perlakuan yang tidak adil dari orang lain. Segala kesulitan tentu saja terjadi karena suatu sebab. Sebab-sebab tersebut Allah ciptakan sebagai ujian bagi hamba-Nya. Ujian tersebut dapat berupa bagaimana sikap dan perilaku selama mengalami kesulitan tersebut, apakah saat diberi kesulitan akan berikhtiar dan berserah diri kepada Allah atau tidak. Demikian halnya dengan kesulitan berupa penyakit, walaupun kesembuhan datang hanya dari Allah SWT, manusia tetap harus berikhtiar dan berserah diri kepada Allah SWT untuk mendapatkan kesembuhan. Manusia sebagai hamba Allah juga harus meyakini bahwa dokter yang kompeten serta metode terapi yang sangat canggih di era kemajuan teknologi

ini merupakan perantara Allah SWT dalam memberikan kesembuhan pada hamba-Nya (Perpustakaan Muslim Kobe, 2008).

Terdapat satu hal yang perlu diyakini kebenarannya, yaitu janji Allah mengenai adanya kenikmatan dan kesenangan setelah kesulitan yang menimpa. Apabila Allah berkehendak dengan iradat-Nya melimpahkan kenikmatan kepada manusia, maka tidak ada suatu hal pun yang mampu menghalangi. Kebahagiaan dan kesenangan merupakan karunia Allah kepada hamba-Nya dan apa yang dikehendaki Allah pasti akan terjadi. Allah merupakan sebaik-baik pengampun dan Allah memiliki kasih sayang yang besar terhadap seluruh umat manusia (Perpustakaan Muslim Kobe, 2008).

Berdasarkan data yang dilansir dari GLOBOCAN (2022), jumlah penderita kanker di dunia mencapai angka 19.968.749 jiwa. Angka tersebut menunjukkan jumlah penderita kanker di seluruh dunia yang sangat besar dan bahkan mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Sebagai upaya dalam membantu mengendalikan lonjakan angka penderita kanker di dunia, diperlukan adanya penanganan khusus terhadap kanker yang berupa terapi, pengobatan atau *treatment*. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk terapi pengobatan kanker, yaitu pembedahan, kemoterapi, imunoterapi, terapi target, terapi hormon atau terapi endokrin, transplantasi sel induk dan terapi radiasi. Namun, untuk saat ini terdapat tiga metode utama dalam menangani kanker, yaitu pembedahan, kemoterapi dan terapi radiasi atau yang sering disebut dengan radioterapi. Dari ketiga metode utama tersebut, salah satu metode penanganan kanker yang cukup efektif digunakan adalah terapi radiasi atau radioterapi (Richter dkk, 2022).

Radioterapi merupakan terapi non-bedah utama dalam pengobatan kuratif kanker (Chino dkk, 2020). Kualitas hasil pengobatan radioterapi dapat bersaing dengan kualitas hasil pengobatan menggunakan metode pembedahan dan kemoterapi. Dengan kualitas yang ditawarkan, biaya radioterapi lebih ekonomis jika dibandingkan dengan dua metode lainnya, yaitu hanya sebesar 5% dari total biaya pengobatan kanker (Chino dkk, 2020).

Terlepas dari itu, radioterapi tetap memiliki beberapa kekurangan, terutama dalam radioterapi konvensional. Kekurangan dari radioterapi konvensional adalah jaringan sehat akan tetap terkena radiasi yang seharusnya radiasi tersebut digunakan untuk membunuh sel kanker (Giri dan Patra, 2020). Hal tersebut tentunya dapat menyebabkan kerusakan pada jaringan sehat. Sebagai upaya meminimalisir risiko yang didapatkan dari radioterapi konvensional, dosis radiasi yang digunakan pada radioterapi konvensional umumnya lebih rendah dari nilai dosis yang seharusnya diberikan kepada pasien. Hal ini bertujuan untuk mengurangi kerusakan pada jaringan sehat dan menghindari efek samping yang tidak diinginkan (Giri dan Patra, 2020).

Sebagai upaya untuk perbaikan dan penyempurnaan kualitas dalam radioterapi, pada tahun 1946 mulai diperkenalkan metode penanganan kanker dengan terapi proton oleh Robert Wilson. Terapi proton menjadi salah satu alternatif penanganan kanker sebagai bentuk upaya penyempurnaan radioterapi. Terapi proton memiliki efektivitas dan efisiensi yang paling besar apabila dibandingkan dengan modalitas lain dalam radioterapi (Khoirunnisa, 2021). Terapi proton memanfaatkan karakteristik puncak bragg (*Bragg peak*). Dalam terapi

proton, energi radiasi dapat terlokalisasi pada sel kanker dan kuantitas paparan radiasi pada jaringan sehat di sekitar sel kanker sangat kecil. Terapi proton mampu memberikan dosis maksimum ke target kanker dan meminimalkan dosis paparan ke *organ at risk* (OAR). Hal ini terjadi karena pada radiasi proton dosis rendah (jalur sebelum *Bragg peak*), sel sehat dapat memperbaiki diri, sementara pada dosis tinggi (*Bragg peak*) radiasi proton akan menyebabkan kerusakan sel yang lebih parah sehingga sel kanker dapat mati. Hal ini menjadi keunggulan terapi proton dibandingkan radioterapi foton atau konvensional (Khoirunnisa, 2021).

Terapi proton mengalami perkembangan yang cukup pesat dalam 15 tahun terakhir. Berdasarkan data yang dilansir dari PTCOG (2024), terdapat 135 unit modalitas terapi proton telah beroperasi yang tercatat hingga bulan Juni 2024. Angka tersebut merupakan data distribusi terapi proton yang tersebar di tiga benua, dengan rincian 49 unit di Asia, 38 unit di Eropa, dan 48 unit di Amerika Utara (Amerika Serikat). Sementara itu, sejumlah 32 unit modalitas terapi proton sedang dalam tahap pembangunan dan 35 unit modalitas terapi proton sedang dalam tahap perencanaan. Untuk perkembangan modalitas terapi proton di Indonesia, saat ini sedang dalam tahap perencanaan. Modalitas terapi proton yang pertama di Indonesia akan dibangun di RSPAD Gatot Subroto.

Dalam penggunaannya, terapi proton membutuhkan *cyclotron* berenergi tinggi yaitu pada rentang nilai 70–250 MeV (Tepper dkk, 2021). Dalam penggunaan partikel proton berenergi tinggi, selain dihasilkan partikel yang digunakan dalam proses *treatment*, dihasilkan pula partikel yang tidak dibutuhkan namun dapat meningkatkan dosis yang akan diterima oleh pasien. Partikel-partikel

tersebut disebut dengan partikel kontaminan (Tepper dkk, 2021). Partikel kontaminan tersebut seperti neutron, foton, positron, dan elektron. Diantara empat jenis partikel kontaminan tersebut, radiasi neutron lebih berbahaya bagi kesehatan manusia karena neutron memiliki nilai *Linear Energy Transfer* (LET) yang paling tinggi (Tepper dkk, 2021).

Radiasi nuklir termasuk radiasi neutron memiliki efek stokastik dan deterministik (Choudhary, 2018). Efek stokastik merupakan efek samping radiasi yang terjadi secara probabilistik. Efek stokastik ini timbul apabila seseorang terpapar radiasi dalam jangka waktu yang cukup lama, misalnya dalam jangka waktu tahunan. Efek stokastik radiasi dalam tubuh manusia seperti terjadinya mutasi genetik, cacat bayi pada kandungan, maupun kanker. Sedangkan efek deterministik merupakan efek samping yang timbul sebagai reaksi jaringan dalam jangka waktu yang pendek setelah terpapar radiasi. Dosis radiasi yang diterima cukup tinggi sehingga berpotensi untuk merusak sel dan jaringan dalam tubuh. Efek deterministik radiasi dalam tubuh manusia seperti *erythema*, katarak, hingga penurunan jumlah kadar darah (Choudhary, 2018).

Prinsip yang digunakan dalam radioterapi adalah ALARA (*as low as reasonably achievable*). Prinsip ALARA menekankan bahwa dalam radioterapi, manfaat yang diterima pasien harus semaksimal mungkin dengan efek samping seminimal mungkin. Prinsip ALARA meliputi tiga aspek yang terdiri dari waktu, jarak, dan *shielding*. Prinsip ALARA menekankan bahwa terapi radiasi harus dilakukan dengan waktu sesingkat mungkin, jarak sejauh mungkin, dan adanya *shielding* dalam ruangan terapi radiasi maupun ruang *cyclotron*. Ketiga aspek

tersebut digunakan untuk mengurangi paparan radiasi yang berlebihan, baik pada masyarakat maupun pekerja radiasi (Oakley dan Harrison, 2020).

Mengingat adanya efek samping dari radiasi yang membahayakan, dibutuhkan adanya upaya proteksi untuk meminimalisir bahaya dan efek samping radiasi baik yang diterima pekerja radiasi maupun masyarakat. Sesuai dengan prinsip ALARA, salah satu hal yang dibutuhkan dalam upaya proteksi radiasi adalah penggunaan *shielding*. *Shielding* merupakan suatu pelindung atau perisai yang berfungsi untuk menyerap radiasi, baik radiasi yang digunakan dalam proses *treatment* maupun radiasi kontaminan. Pengadaan *shielding* tidak hanya dibutuhkan pada ruang *bunker* atau ruang *treatment*, namun juga dibutuhkan pada ruang penyimpanan *cyclotron*. *Shielding* diperlukan untuk mencegah adanya kebocoran radiasi ke luar ruangan sehingga nilai batas dosis radiasi yang diterima oleh pekerja radiasi maupun masyarakat tidak melebihi regulasi yang telah ditetapkan. Perka BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 telah mengatur Nilai Batas Dosis (NBD) bagi pekerja radiasi sebesar 20 mSv/tahun dan bagi masyarakat sebesar 1 mSv/tahun (BAPETEN, 2013).

Dalam modalitas terapi proton, dibutuhkan adanya *shielding* yang bertujuan untuk menyerap radiasi, terutama partikel kontaminan seperti neutron. Optimalisasi *shielding* terapi proton dapat dilakukan dengan pemilihan material yang mampu menyerap radiasi neutron. Apabila material yang digunakan telah mampu menyerap radiasi neutron, maka material tersebut kemungkinan cukup mampu menyerap jenis-jenis radiasi yang lainnya (Salam dkk, 2021).

Penelitian mengenai analisis jenis material *shielding* yang mampu menyerap radiasi neutron berenergi tinggi telah dilakukan oleh Shao dkk (2024), dengan penggunaan material yang terdiri dari 10% partikel boron karbida (B₄C), 13,64% polietilen ikatan silang (PE) dan 76,36% berat partikel tungsten. Selanjutnya, penelitian yang serupa juga telah dilakukan oleh Fitrotun dkk (2023), dengan variasi material yang digunakan adalah besi, aluminium, *Concrete Cathode Ray Tube* (CRT), dan *Borated Polietilen* (BPE) dengan masing-masing 35 cm menggunakan kode PHITS. Hsieh dkk (2023) juga melakukan penelitian mengenai simulasi penggunaan material *ordinary concrete* dengan tambahan *steel* dan *lead* dengan ketebalan 1,7 m hingga 4,7 m sebagai *shielding* terapi proton. Berikutnya, Gao dkk (2022) juga melakukan penelitian untuk menghitung nilai fluensi neutron menggunakan Monte Carlo FLUKA dan PHITS dengan material *shielding* yang digunakan adalah beton yang dicampur dengan fragmen *Cathode Ray Tube* (CRT). Selain itu, Garcia-Fernandez dkk (2021) juga telah melakukan penelitian terkait validasi *shielding* pada *Compact Proton Therapy Centers* (CPTC) dengan kode MCNP6® versi 6.2 berdasarkan nilai konservatif dosis setara ambien H*(10).

Berdasarkan beberapa penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya, belum terdapat penelitian yang secara spesifik melakukan simulasi terkait variasi material dan ketebalan *shielding* yang dapat menyerap radiasi neutron yang dihasilkan sebagai partikel kontaminan pada modalitas terapi proton. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian ini untuk menyempurnakan hasil dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang akan dilakukan juga disertai dengan analisis terhadap nilai *flux* dan laju dosis radiasi. Pemilihan penggunaan metode

simulasi atau komputasi bertujuan untuk mengetahui efektivitas dan efisiensi dari variasi material dan ketebalan *shielding* dalam menyerap radiasi dengan rentang energi yang besar, mulai dari energi minimum yaitu 70 MeV hingga energi maksimum yaitu 230 MeV. Adapun beberapa material yang akan dianalisis efektivitasnya sebagai *shielding* pada modalitas terapi proton adalah besi, aluminium, beton (*concrete*), *Borated Polyethylene* (BPE), tungsten dengan variasi ketebalan pada setiap material.

Simulasi yang dilakukan berbasis metode *Monte Carlo*. Metode *Monte Carlo* mampu menyimulasikan kemampuan setiap variasi material dan ketebalan *shielding* yang digunakan dalam menyerap radiasi neutron dengan baik. Dalam beberapa penelitian sebelumnya, metode *Monte Carlo* telah teruji akurasi dalam menyimulasikan beberapa jenis radiasi, seperti radiasi proton dan neutron. Analisis dan simulasi dilakukan dengan menggunakan *software Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS). PHITS merupakan salah satu *software* berbasis metode *Monte Carlo* yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA). PHITS menggunakan pengkodean *Monte Carlo* yang dapat menyimulasikan hampir semua jenis partikel seperti neutron, proton, ion berat, meson, foton, dan elektron dalam rentang energi yang sangat besar, yaitu mulai dari 10^{-5} eV hingga 1 TeV (JAEA, 2023).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini, meliputi:

1. Bagaimana desain sistem *shielding* pada ruangan *cyclotron* yang digunakan dalam modalitas terapi proton?

2. Bagaimana simulasi sistem *shielding* pada ruangan *cyclotron* yang digunakan dalam modalitas terapi proton?
3. Bagaimana perbedaan besarnya nilai *flux* pada setiap variasi material *shielding* yang digunakan?
4. Bagaimana perbedaan besarnya nilai laju dosis pada setiap variasi material *shielding* yang digunakan?
5. Bagaimana menentukan material yang paling tepat digunakan sebagai *shielding* modalitas terapi proton dari besi, aluminium, beton (*concrete*), *Borated Polyethylene* (BPE), dan tungsten?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan diadakannya penelitian ini, meliputi:

1. Membuat desain sistem *shielding* pada ruangan *cyclotron* yang digunakan dalam modalitas terapi proton.
2. Menyimulasikan sistem *shielding* pada ruangan *cyclotron* yang digunakan dalam modalitas terapi proton.
3. Menganalisis perbedaan besarnya nilai *flux* pada setiap variasi material *shielding* yang digunakan.
4. Menganalisis perbedaan besarnya nilai laju dosis pada setiap variasi material *shielding* yang digunakan.
5. Menentukan material yang paling tepat digunakan sebagai *shielding* modalitas terapi proton dari besi, aluminium, beton (*concrete*), *Borated Polyethylene* (BPE), dan tungsten.

1.4 Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian ini, meliputi:

1. Simulasi dilakukan pada ruang *cyclotron* tipe P235 produksi Sumitomo Heavy Industries Ltd. keluaran tahun 2014 dan ruang *beam transport system* pada modalitas terapi proton di Aizawa Hospital Japan.
2. Sumber proton yang akan disimulasikan dalam rentang energi 70 MeV hingga 230 MeV dengan interval 40 MeV dan kuat arus 200 nA.
3. *Software* yang digunakan dalam proses simulasi yaitu *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS) versi 3.34.
4. Partikel kontaminan yang dianalisis adalah neutron.
5. Simulasi dilakukan pada keadaan modalitas terapi proton beroperasi dengan normal.
6. Panduan Nilai Batas Dosis (NBD) radiasi berdasarkan Perka BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013.
7. Panduan nilai pembatas dosis radiasi berdasarkan Perka BAPETEN Nomor 3 Tahun 2013.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini, meliputi:

1. Dapat digunakan sebagai sumber referensi dalam menentukan variasi material dan ketebalan material yang ideal untuk digunakan sebagai *shielding* modalitas terapi proton.
2. Menambah pengetahuan dan pemahaman mengenai adanya partikel kontaminan dari *cyclotron* yang menghasilkan proton berenergi tinggi,

sehingga partikel kontaminan tersebut harus diserap dengan optimal oleh material *shielding* agar tidak menambah dosis radiasi yang diterima pasien serta tidak meningkatkan nilai dosis radiasi yang diterima masyarakat dan pekerja radiasi.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain sistem *shielding* telah berhasil disimulasikan menggunakan *software Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)*. Desain ruangan terdiri dari ruangan *cyclotron* dan ruangan *beam transport system* yang disesuaikan dengan penggunaan klinis pada Aizawa Hospital Japan.
2. Simulasi sistem *shielding* menunjukkan bahwa material yang mampu menyerap radiasi neutron yang dihasilkan sebagai partikel kontaminan dari modalitas terapi proton secara optimal adalah material *concrete* dan tungsten.
3. Penggunaan *shielding* dapat mengurangi nilai *flux* radiasi neutron dalam ruangan. Hasil simulasi pada ruangan tanpa *shielding* menunjukkan nilai *flux* yang cukup tinggi dan nilai *flux* mengalami penurunan setelah dinding ruangan dilapisi dengan *shielding*. Saat energi sumber yang digunakan semakin besar, maka nilai *flux* neutron dan laju dosis neutron yang dihasilkan juga akan semakin besar.
4. Nilai laju dosis yang secara keseluruhan memenuhi standar yang ditetapkan oleh BAPETEN merupakan nilai laju dosis pada ruangan dengan *shielding* material *concrete* dan material tungsten. Nilai laju dosis pada beberapa dinding ruangan *shielding* material aluminium, besi dan BPE belum memenuhi standar yang ditetapkan oleh BAPETEN.

5. Material yang tepat digunakan sebagai *shielding* modalitas terapi proton adalah material *concrete* dan tungsten. Pemilihan *concrete* sebagai material *shielding* membutuhkan *cost* yang lebih sedikit dibandingkan dengan tungsten. Namun, *concrete* memiliki titik leleh yang lebih rendah dibandingkan tungsten. Titik leleh ini akan berpengaruh terhadap manajemen perawatan dan masa ketahanan *shielding*.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan geometri simulasi yang lebih kompleks meliputi bagian atap dan alas ruangan. Selain itu, penelitian dapat dikembangkan untuk eksplorasi material komposit baru yang dapat digunakan sebagai *shielding* dengan diperkuat validasi eksperimental. Penelitian selanjutnya juga dapat lebih diintegrasikan dengan keadaan klinis, seperti penggunaan kombinasi spektrum energi sumber untuk mendekati keadaan nyata dalam klinis.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, Fadhil, Mkhaiber., & Salwah, Kareem, Dawood. 2019. Calculation of Shielding Parameters of Fast Neutrons for Some Composite Materials. *Al-Mustansiriyah Journal of Science*, **Vol. 30 No. 1** 2019: 210–215. <https://doi.org/10.23851/mjs.v30i1.520>.
- Asma, Fadhila, Khoirunnisa., Suharyana., & Riyatun. 2021. Analisis Distribusi Dosis Pada Terapi Proton untuk Karsinoma Nasofaring menggunakan Perangkat Lunak MCNP6. *Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya*, 2021: 1–50. <https://doi.org/10.20961/prosidingsnfa.v5i0.71817>.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2013. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 3 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Jakarta: Badan Pengawas Tenaga Nuklir.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2013. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Jakarta: Badan Pengawas Tenaga Nuklir.
- Bin, Gan., Shichang, Liu., Zhen, He., Fucui, Chen., Haoxuan, Niu., Jingchang, Cheng., Bo, Tan., & Bo, Yu. 2021. Research Progress of Metal-Based Shielding Materials for Neutron and Gamma Rays. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **Vol. 34 No. 12** 2021: 1609–1617. <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01259-5>.
- Copur, Mehmet, Sitki. 2019. State of Cancer Research Around the Globe. *Oncology (Williston Park)*, **Vol. 33 No. 5** Mei 2019: 181–185.
- Ervin, Podgorsak. (2005). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. Austria: International Atomic Energy Agency.
- Felipe, Calvo., Jacobo, Palma., Javier, Serrano., Mauricio, Cambeiro., Rosa, Meiriño., Santiago, Martin., Diego, Azcona., Diego, Pedrero., Borja, Aguilar., Jose, Miguel, Delgado., Veronica, Moran., Alberto, Viñals., Pablo, Cabello., Elena, Panizo., Alavro, Lassaletta., Carlota, Gibert., Lidia, Sancho., Jose, Maria, Fernandez, de Miguel., Beatriz, Alvarez, de Sierra., Andrez, Alcázar., Victor, Suarez., Alberto, Alonso., Guillermo, Gallardo., & Javier, Aristu. 2023. Hospital-Based Proton Therapy Implementation During COVID Pandemic: Early Clinical And Research Experience In A European Academic Institution. *Clinical and Translational Oncology*, **Vol. 25 No. 5** 2024: 1268– 1276. <https://doi.org/10.1007/s12094-023-03127-3>.
- Fitriatuzzakiyyah, Nur., Sinuraya, Rano, K., & Puspitasari, Irma, M. 2017. Cancer Therapy with Radiation: The Basic Concept of Radiotherapy and Its Development in Indonesia. *Indonesian Journal of Clinical Pharmacy*, **Vol. 6**

No. 4 Desember 2017: 311–320. <https://doi.org/10.15416/ijcp.2017.6.4.311>.

Fitrotun, Aliyah., Azhar, Abdul, Rahmad., Yasmin, Md. Radzi., & Imam, Kambali. 2023. Combined Method of Bulk Material Shielding Evaluation for 200 MeV High Energy Neutron Source Using PHITS Modelling and Partial Density. *Spektra: Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, **Vol. 8 No. 1** April 2023: 1–16. <https://doi.org/10.21009/spektra.081.01>.

Gao, Han., Chen, Long., Tang, Bo., Wang, Yidi., Du, Chuansheng., Liu, Kun., Qiu, Dong., Kong, Xianghui., Yang, Bing., Yin, Yuchen., Zhang, Wenyue., Tu, Yu., & Sun, Liang. 2022. Calculation of Shielding Performance of CRT Concrete for Proton Therapy and Optimal Shielding Design of Treatment Delivery Room. *Applied Radiation and Isotopes*, **Vol. 189** November 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110432>.

Garcia-Fernandez, Gonzalo, F., Gallego, Eduardo., Jose, M., Hector, Gomez-Ros, R., Vega-Carrillo., Garcia-Baonza, Roberto., Cevallos-Robalino, Lenin, E., & Guzman-Garcia, Karen, A. 2020. Neutron Dosimetry and Shielding Verification in Commissioning of Compact Proton Therapy Centers (CPTC) using MCNP6.2 Monte Carlo Code. *Applied Radiation and Isotopes*, **Vol. 169** Maret 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109279>.

George, Coutrakon. 2016. Accelerators for Heavy-Charged-Particle Radiation Therapy Loma Linda Proton Accelerator. *Technology in Cancer Research and Treatment* **Vol. 6 No. 4** Agustus 2007: 49–54.

GLOBOCAN. (2022). *Latest Global Cancer Data Shows Rising Incidence and Stark Inequities*. Diakses 15 Agustus 2024 dari <https://gco.iarc.fr/en>.

Herman, Chember., & Thomas, Johnson. 2008. *Introduction to Health Physics* (4th ed.). New York: McGraw-Hill Medical.

Hsieh, Ying-I., Lai, Bo-Lun., Shiau, An-Cheng Shiau., Chen, Huang-Lung., & Sheu, Rong-Jiun. 2023. Shielding Analysis of The Proton Therapy Facility at China Medical University Hospital: Comparison of Simplified Approach with Monte Carlo Simulations. *Radiation Protection Dosimetry*, **Vol. 199 No. 15-16** 2023: 1947-1952. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncac241>.

Japan Atomic Energy Agency. 2023. *PHITS 3.34 User 's Manual English version*. Japan: JAEA.

Joel, Tepper., Robert, Foote., & Jeff, Michalski. 2021. *Clinical Radiation Oncology* (5th ed.). Amsterdam: Elsevier.

Junzo, Chino., Christina, Annunziata., Sushil, Beriwal., Lisa, Bradfield., Beth, Erickson., Emma, Fields., KathrynJane, Fitch., Matthew, Harkenrider,

- Christine, Holschneider., Mitchell, Kamrava., Eric, Leung., Lilie, Lin., Jyoti, Mayadev., Marc, Morcos., Chika, Nwachukwu., Daniel, Petereit., Akila, Viswanathan. 2020. Radiation Therapy for Cervical Cancer: Executive Summary of an ASTRO Clinical Practice Guideline. *Practical Radiation Oncology*, **Vol. 10 No. 4** 2020: 220–234.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2018. *Dirjen Pelayanan Kesehatan: Radiasi Pada Kanker Payudara*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Knoll, Glenn, F. 2010. *Radiation Detection and Measurement*. New York: John Wiley & Sons.
- Man, Hu., Liyang, Jiang., Xiangli, Cui., Jianguang, Zhang., & Jinming, Yu. 2018. Proton Beam Therapy for Cancer in The Era of Precision Medicine. *Journal of Hematology and Oncology*, **Vol. 11 No. 1** Desember 2018: 1–16. <https://doi.org/10.1186/s13045-018-0683-4>.
- Mayarani., Eka, Putra, Syarif, Hidayat., Nursama, Heru, Apriantoro., Robert, Kristian., & Muhammad, Irsal. 2018. Analysis of Rooftop Skyshine Radiation Exposure With Angle Of Gantry Linear Accelerator 180° In Radiotherapy Unit Of Pertamina Central Hospital Jakarta. *SANITAS : Jurnal Teknologi Dan Seni Kesehatan*, **Vol. 9 No. 1** 2018: 24–34. <https://doi.org/10.36525/sanitas.2018.4>.
- Mortazavi., Kardan., Sina., Baharvand., & Sharafi. 2016. Design and Fabrication of High Density Borated Polyethylene Nanocomposites as a Neutron Shield. *International Journal of Radiation Research*, **Vol 14 No. 4** Oktober 2016: 379–383. <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijrr.14.4.379>.
- Noreman, Coleman., Jeffrey, Buchsbaum., Pataje, Prasanna., Jacek, Capala., Ceferino, Obcemea., Michael, Espey., Mansoor, Ahmed., Julie, Hong., & Bhadrassain Vikram. 2021. Moving Forward in the Next Decade: Radiation Oncology Sciences for Patient-Centered Cancer Care. *JNCI Cancer Spectrum*, **Vol. 5 No. 4** Mei 2021: 1–10. <https://doi.org/10.1093/jncics/pkab046>.
- Nurhayati., & Neng, Nenden, Mulyaningsih. 2020. Penerapan Radioterapi Pada Pengobatan Kanker Payudara. *Schrodinger Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pendidikan Fisika*, **Vol. 1 No. 2** 2020: 88–94. <https://doi.org/10.30998/sch.v1i2.3137>.
- Particle Therapy Co-Operative Group. 2024. *Facilities in Operation*. Diakses 15 September 2024 dari <https://ptcog.site/index.php/facilities-in-operation-public>.

- Paul, Oakley., & Deed, Harrison. 2020. Death of the ALARA Radiation Protection Principle as Used in the Medical Sector. *Dose-Response*, **Vol. 18 No. 2** 2020: 1–12. <https://doi.org/10.1177/1559325820921641>.
- Perpustakaan Muslim Kobe. 2008. *Tafsir Ibnu Katsir Surah Yunus*. Jepang: Kobe University.
- Radhe, Mohan. 2022. A Review of Proton Therapy-Current Status and Future Directions. *Precision Radiation Oncology*, **Vol. 6 No. 2** Juni 2022: 164–176. <https://doi.org/10.1002/pro6.1149>.
- Ramon, Casanovas., Elena, Prieto., & Marçal, Salvadó. 2016. Calculation of The Ambient Dose Equivalent $H^*(10)$ from Gamma-Ray Spectra Obtained with Scintillation Detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, **Vol. 118** 2016: 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.09.001>.
- Richter, Luiz, Egon., Carlos, Augusto., & Beber, De, Meneze. 2022. *Handbook of Radiotherapy Physics* (Second Edition). United States: CRC Press.
- Rohmad, Salam., Agus, Salim, Afrozi., Auring., & Asep, Nana. 2021. Synthesis of Shielding Radiation Neutron Materials Made from Wood Powder with Variation of Borax Content. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, **Vol. 5 No. 1** Januari 2021: 1-7. <https://doi.org/10.32493/jitk.v5i1.6485>.
- Salim, Barbhuiya., Bibhuti, Bhusan, Das., Paul, Norman., & Tanvir, Qureshi. 2024. A Comprehensive Review of Radiation Shielding Concrete: Properties, Design, Evaluation, and Applications. *Structural Concrete*, **Vol. 25** 2024: 1–47. <https://doi.org/10.1002/suco.202400519>.
- Saravana, S. Kousik. 2023. *Fundamentals of Cancer Biology*. India: Abhayam Publishers.
- Saumyakanti, Giri., & Falguni, Patra. 2020. A Brief Review on Proton Therapy: An Advanced Tool for Cancer Treatment. *Journal of PharmaSciTech*, **Vol. 9 No. 1** September 2020: 32–33. <https://doi.org/10.33981/jpst.2020.v09i01.006>.
- Shao, Qiankun., Zhu, Qingjun., Wang, Yuling., Kuang, Shaobao., Bao., & Liu, Songlin. 2024. Development and Application Analysis of High-Energy Neutron Radiation Shielding Materials from Tungsten Boron Polyethylene. *Nuclear Engineering and Technology*, **Vol. 56 No. 6** 2024: 2153–2162. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.01.023>.
- Sofiya, Choudhary. 2018. Deterministic and Stochastic Effects of Radiation. *Cancer Therapy and Oncology International Journal*, **Vol. 12 No. 2** Oktober 2018: 1-2. <https://doi.org/10.19080/CTOIJ.2018.02.555834>.

Susilo, Widodo., Purwani., Suyanti, Sudibyo., Syarip., & Akhmad, Muzakky, Mutawali. 2019. *Dari Monasit ke Thorium Bahan Baku Bahan Bakar Nuklir dan Radioisotop Medik*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

Tsutsui, H., Hashimoto, A., Mikami, Y., Mitsubori, H., Mitsumoto, T., Touchi, Y., Ueda, T., Uno, K., Watazawa, K., Yajima, S., Yoshida, J., & Yumoto, K. 2014. Design study of a superconducting AVF cyclotron for proton therapy. *Proceedings of the 20th International Conference on Cyclotrons and Their Applications*, Canada, 102–104.

Wayne, Newhauser., & Rui, Zhang. 2015. The Physics of Proton Therapy. *Physics in Medicine and Biology*, **Vol. 60 No. 8** 2015: R155–R209. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/8/R155>.

Wazir, Muhammad., Amjad, Hussain., & Muhammad, Maqbool. 2017. *Basic Concepts in Radiation Dosimetry*. Switzerland: Springer International Publishing AG.