

**SIMULASI DOSIS BORON DAN WAKTU IRADIASI PADA
PENGOBATAN KANKER PARU DENGAN *BORON NEUTRON CAPTURE
THERAPY (BNCT)* MENGGUNAKAN MCNP-6**

TUGAS AKHIR

Untuk Memperoleh Persyaratan Gelar Sarjana derajat S-1

Program Studi Fisika



Disusun oleh:

Kevin Kautsar Soelistiyono

18106020051

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2023

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kevin Kautsar Soelistiyono

NIM : 18106020051

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Simulasi Dosis Boron dan Waktu Iradiasi pada Pengobatan Kanker Paru dengan *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) Menggunakan 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.

Yogyakarta, 6 Agustus 2023

Penulis



Kevin Kautsar Soelistiyono
18106020051

PENGESAHAN TUGAS AKHIR



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-2314/Un.02/DST/PP.00.9/08/2023

Tugas Akhir dengan judul : SIMULASI DOSIS BORON DAN WAKTU IRADIASI PADA PENGOBATAN KANKER PARU DENGAN BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) MENGGUNAKAN MCNP-6

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : KEVIN KAUTSAR SOELISTYONO
Nomor Induk Mahasiswa : 18106020051
Telah diujikan pada : Jumat, 18 Agustus 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: 64e6f28403bf5



Penguji I

Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED

Valid ID: 64e6e56529a8



Penguji II

Andi, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 64e6ee8f613ca



Yogyakarta, 18 Agustus 2023
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 64e804955427e

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

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 : KEVIN KAUTSAR SOELISTIYONO
NIM : 18106020051
Judul Skripsi : SIMULASI DOSIS BORON DAN WAKTU IRADIASI PADA PENGOBATAN
KANKER PARU DENGAN BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT)
MENGUNAKAN 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, 2 Agustus 2023

Pembimbing I

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

Pembimbing II

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

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

“Motivasi terbaik adalah pengalaman dan perjuanganmu yang pernah menghadapi
dan menyelesaikan sesuatu”

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr... Wb...

Puji syukur tidak henti-hentinya penulis haturkan ke hadirat Allah SWT. yang senantiasa melimpahkan rahmat, karunia, kesempatan, dan kelancaran-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “**Simulasi Dosis Boron dan Waktu Iradiasi Pada Pengobatan Kanker Paru dengan *Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Menggunakan MCNP-6***”. Tugas akhir ini disusun dan diajukan sebagai syarat untuk memperoleh derajat Sarjana S-1 Sains Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Penulis menyadari bahwa selama penyusunan tugas akhir ini, tidak lepas dari berbagai kesalahan dan kekurangan, serta adanya berbagai ujian yang penulis alami hingga akhirnya tugas akhir ini terselesaikan. Penulis pada kesempatan ini menyampaikan terimakasih yang setulus-tulusnya atas bimbingan, dukungan secara moral, arahan, dan koreksi, yang telah diberikan selama penyusunan laporan kepada:

1. Allah SWT yang telah memberi nikmat waktu, kesehatan, dan kelancaran sehingga kegiatan kerja praktek ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Ibu Sri Retno Wulandari sebagai orang tua dan kedua adik yang berbahagia (Zetta dan Quirrine) yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Dr. Phil Al Makin, MA sebagai Rektor Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Ibu Dr. Hj. Khurul Wardati, M.Si. sebagai Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.
5. Ibu Anis Yuniarti, Ph.D selaku Ketua Program Studi Fisika yang selalu memberi bantuan dalam segala kebutuhan yang berhubungan dengan perkuliahan.

6. Ibu Dr. Nita Handayani S.Si., M.Si. sebagai Dosen Pembimbing tugas akhir atas segala bimbingan, arahan, serta saran yang diberikan kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
7. Bapak Fajar Arianto, S.Si., M.Si. sebagai Dosen Pembimbing penelitian atas segala bimbingan, arahan, serta masukan yang diberikan kepada penulis sehingga penelitian yang dilakukan secara daring (online) dan luring (offline) ini dapat berjalan dengan lancar.
8. Seluruh Dosen dan PLP Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah mengajarkan dan memberikan ilmunya.
9. Program Studi Fisika FSM UNDIP yang telah memberi kesempatan kepada penulis dalam melakukan penelitian pemodelan MCNP-6.
10. Mumung, Aeni, Lydia, Ahmad, Tri, Anggita, Aelfian, Marco, Aji, Haidar, dan semua teman seperjuangan dalam menyelesaikan tugas akhir yang selalu saling mendukung dan memotivasi.
11. Seluruh rekan-rekan fisika angkatan 2018 UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang namanya tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang selalu mendukung dan mendoakan.
12. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang sudah membantu, mendoakan dan menyemangati hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Akhir kata, penulis memohon maaf yang sedalam-dalamnya apabila selama penelitian hingga penyusunan tugas akhir ini terdapat banyak kekurangan, kesalahan, baik dalam perkataan maupun perbuatan, kepada pihak-pihak dan rekan-rekan yang terlibat dalam penyusunan laporan ini. Maka dari itu, segala saran dan kritik yang membangun dan bermanfaat sangat penulis harapkan dalam pengembangan tugas akhir ini menjadi lebih baik. Penulis berharap apa yang disampaikan dalam tugas akhir ini dapat memberi manfaat bagi kita semua kelak di waktu yang akan datang. Akhir kata, semoga seluruh proses penyusunan tugas akhir ini mendapatkan Ridho dari Allah SWT. Amin.

Wassalamualaikum Wr... Wb...

Yogyakarta, 6 Agustus 2023

Penulis,

Kevin Kautsar Soelistiyono



SIMULASI DOSIS BORON DAN WAKTU IRADIASI PADA PENGobatan KANKER PARU DENGAN BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) MENGGUNAKAN MCNP-6

Kevin Kautsar Soelistiyono
18106020051

INTISARI

Boron Neutron Capture Therapy merupakan salah satu metode radioterapi yang digunakan pada pengobatan penyakit kanker. Metode ini menggunakan agen pembawa Boron berupa senyawa yang diinjeksikan ke dalam tubuh, kemudian mengalir menuju sel kanker. Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi pengobatan BNCT dengan menggunakan *software Monte Carlo N Particle* versi 6.2 pada studi kasus kanker paru. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menganalisis jumlah konsentrasi Boron efektif dan lama waktu iradiasi yang optimal pada terapi kanker paru. Pada penelitian ini, objek yang digunakan sebagai bahan penelitian adalah kanker yang terletak di paru-paru bagian kanan dengan organ sekitar beresiko antara lain kulit, tulang rusuk, dan paru-paru bagian kanan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan pembuatan kode program yang selanjutnya disimulasikan dengan MCNP-6.2.. Simulasi ini menghasilkan output berupa fluks neutron, laju dosis hamburan neutron, dan laju dosis gamma. Ketiga *output* ini kemudian digunakan dalam perhitungan untuk mencari nilai dosis serap pada setiap variasi konsentrasi Boron dan lama waktu iradiasi berdasarkan dosis serap yang telah ditentukan. Adapun variasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menggunakan konsentrasi Boron sebesar 40 $\mu\text{g/g}$, 45 $\mu\text{g/g}$, 50 $\mu\text{g/g}$, 55 $\mu\text{g/g}$, dan 60 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker dengan interval 5 $\mu\text{g/g}$. Hasil penelitian menunjukkan keterkaitan antara besar konsentrasi Boron yang diinjeksikan dengan lama waktu iradiasi, dimana semakin besar konsentrasi Boron yang diinjeksikan lama waktu iradiasi akan semakin singkat. Besarnya konsentrasi Boron yang diinjeksikan juga berpengaruh pada dosis efektif yang diserap oleh jaringan sehat di sekitar sel kanker. Dari kelima variasi konsentrasi tersebut, konsentrasi Boron yang efektif untuk terapi kanker paru adalah sebesar 60 $\mu\text{g/g}$, dengan efek deterministik kematian sel pada sumsum tulang rusuk dan paru-paru bagian kanan. Tetapi, konsentrasi 60 $\mu\text{g/g}$ lebih efektif karena waktu iradiasi yang dilakukan selama terapi kanker adalah yang paling singkat diantara kelima variasi tersebut berdasarkan prinsip ALARA (*As Low As is Reasonably Achievable*).

Kata Kunci: Kanker Paru, BNCT, MCNP, Konsentrasi Boron, Waktu Iradiasi, Metode

***SIMULATION OF BORON DOSE AND IRRADIATION TIME IN LUNG
CANCER TREATMENT WITH BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY
(BNCT) USING MCNP-6***

Kevin Kautsar Soelistiyono
18106020051

ABSTRACT

Boron Neutron Capture Therapy is one of the radiotherapy methods used in the treatment of cancer. This method uses a boron carrier agent, a compound that is injected into the body and then flows toward cancer cells. In this study, a simulation of the treatment of BNCT was carried out using Monte Carlo N Particle software version 6.2 in a case study of lung cancer. The main objective of this study is to analyze the quantity of effective boron and the long duration of radiation that is optimal in the treatment of lung cancer. In this study, the object used as the research material is cancer located in the right lung, with surrounding organs at risk, among them the skin, ribbons, and right lung. The method used in this research is to make a program code that is then simulated with the MCNP-6.2. This simulation produces outputs such as neutron flow, neutron burst dose rate, and gamma dose rate. These three outputs are then used in the calculation to find the value of the absorbent dose at any variation of the concentration of boron and the radiation time length based on the determined absorbing dose. The variations in this study were the use of concentrations of 40 $\mu\text{g/g}$, 45 $\mu\text{g/g}$, 50 $\mu\text{g/g}$, 55 $\mu\text{g/g}$, and 60 $\mu\text{g/g}$ of cancer tissue at intervals of 5 $\mu\text{g/g}$. The results of the study showed a correlation between a large concentration of injected boron and a long irradiation time, where the greater the concentration, the longer the radiation time will be. Of the five concentration variations, the effective concentration of boron for lung cancer therapy is 60 $\mu\text{g/g}$, with the deterministic effect of cell death on the rib marrow and the right lung. However, the concentration is more effective because the irradiation time performed during the cancer treatment is the shortest of the five variations based on the ALARA principle. (As Low As Is Reasonably Achievable)

Keywords: *Lung Cancer, BNCT, MCNP, Boron Concentration, Irradiation Time, Method*

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	i
PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI.....	iii
PERSEMBAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
INTISARI.....	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xviii
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.....	9
BAB II	
TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1. Studi Pustaka	10
2.2. Landasan Teori	15
2.2.1. Kanker Paru	15

2.2.2.	Interaksi Radiasi dengan Materi	25
2.2.3.	<i>Boron Neutron Capture Therapy</i>	31
2.2.4.	<i>Monte Carlo N-Particle</i>	35
2.2.5.	Reaktor Nuklir Sebagai Sumber Neutron	38
2.2.6.	Prinsip ALARA.....	41
2.2.7.	Pandangan Islam tentang Pemanfaatan Teknologi untuk Pengobatan 43	
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.	Tahapan Penelitian	51
3.3.1.	Studi Pustaka.....	52
3.3.2.	Akumulasi Data Material.....	52
3.3.3.	Pembuatan Kode <i>Input</i> MCNP-6.....	53
3.3.4.	Running MCNP-6.....	55
3.3.5.	Output Running MCNP-6.....	55
3.3.6.	Visualisasi Program	56
3.3.7.	Perhitungan Data.....	56
3.4.	Metode Analisa Data	61
3.4.1.	Bentuk Geometri Paru dengan <i>software</i> MCNP-6.....	61
3.4.2.	Konsentrasi Boron Efektif pada Pengobatan Kanker Paru dengan Metode BNCT.....	62

3.4.3.	Waktu Iradiasi Optimal pada Pengobatan Kanker Paru dengan Metode BNCT.....	62
BAB IV		
HASIL DAN PEMBAHASAN		63
4.1.	Hasil Penelitian	63
4.1.1.	Desain Geometri	63
4.1.2.	<i>Output</i> Fluks Neutron	66
4.1.3.	Perhitungan Laju Dosis.....	67
4.1.4.	Perhitungan Waktu Iradiasi.....	68
4.2.	Pembahasan.....	69
4.2.1.	Desain Kolimator.....	69
4.2.2.	Desain Geometri Phantom.....	71
4.2.3.	Fluks Neutron	72
4.2.4.	Dosis Boron	77
4.2.5.	Waktu Iradiasi dan Dosis Serap	80
4.3.	Validasi Penelitian.....	84
4.4.	Integrasi-Interkoneksi.....	87
BAB V		
PENUTUP.....		89
5.1.	Kesimpulan.....	89
5.2.	Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA.....		91
LAMPIRAN.....		95
<i>CURRICULUM VITAE</i>		114

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi kanker paru (Mayo Clinic, 2022).....	16
Gambar 2.2 Kanker paru stadium 1A (National Library of Medicine, 2002)	17
Gambar 2.3 Kanker paru stadium 1B (National Library of Medicine, 2002)	18
Gambar 2.4 Kanker paru stadium 2A (National Library of Medicine, 2002)	18
Gambar 2.5 Kanker paru stadium 2B (National Library of Medicine, 2002)	19
Gambar 2.6 Kanker paru stadium 3A bag.1 (National Library of Medicine, 2002)	20
Gambar 2.7 Kanker paru stadium 3A bag.2 (National Library of Medicine, 2002)	20
Gambar 2.8 Kanker paru stadium 3B (National Library of Medicine, 2002)	21
Gambar 2.9 Kanker paru stadium 3C (National Library of Medicine, 2002)	21
Gambar 2.10 Kanker paru stadium 4A (National Library of Medicine, 2002) ...	22
Gambar 2.11 Kanker paru stadium 4B (National Library of Medicine, 2002) ...	22
Gambar 2.12 Ilustrasi proses pelepasan atom pada molekul air (IAEA, 2004) ..	26
Gambar 2.13 Ilustrasi senyawa Boron di dalam sel kanker (Ardana, 2018)	32
Gambar 2.14 Ilustrasi pergerakan neutron pada material yang disimulasikan dengan Monte Carlo (Muslih dkk, 2014)	36
Gambar 2.15 Bagian-bagian penyusun kolimator (Fauziah, 2013).....	40
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian simulasi BNCT pada terapi kanker paru....	52
Gambar 3.2 Tampilan Proses Running MCNP 6.....	55
Gambar 3.3 Tampilan output dari running MCNP-6.....	56
Gambar 4.1 Desain Kolimator BNCT	63
Gambar 4.2 Desain geometri tubuh tampak samping.....	64
Gambar 4.3 Desain geometri kanker tampak samping.....	64
Gambar 4.4 Desain geometri tubuh dan kanker tampak atas	65
Gambar 4.5 Distribusi fluks neutron thermal pada jaringan tubuh	65
Gambar 4.6 Grafik distribusi fluks neutron pada jaringan tubuh pada konsentrasi Boron 40 $\mu\text{g/g}$	73
Gambar 4.7 Grafik distribusi fluks neutron pada jaringan tubuh pada konsentrasi Boron 45 $\mu\text{g/g}$	73

Gambar 4.8 Grafik distribusi fluks neutron pada jaringan tubuh pada konsentrasi Boron 50 $\mu\text{g/g}$	74
Gambar 4.9 Grafik distribusi fluks neutron pada jaringan tubuh pada konsentrasi Boron 55 $\mu\text{g/g}$	74
Gambar 4.10 Grafik distribusi fluks neutron pada jaringan tubuh pada konsentrasi Boron 60 $\mu\text{g/g}$	75
Gambar 4.11 Grafik laju dosis total terhadap jaringan tubuh.....	78
Gambar 4.12 Grafik waktu iradiasi tiap variasi konsentrasi boron	81
Gambar 4.13 Grafik dosis serap setiap jaringan tubuh.....	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Daftar studi pustaka	14
Tabel 2.2 Klasifikasi fluks neutron berdasarkan rentang energi (Podgorsak, 2015).....	28
Tabel 2.3 Parameter Sumber Neutron (IAEA, 2001)	30
Tabel 2.4 Jenis tally yang digunakan pada program MCNP 6 (Armstrong dkk, 2017).....	38
Tabel 3.1 Material Jaringan CTV (McConn Dkk, 2011).....	49
Tabel 3.2 Material Jaringan GTV (McConn Dkk, 2011).....	49
Tabel 3.3 Material Jaringan PTV (Rucker dkk, 2011).....	49
Tabel 3.4 Material Jaringan Lunak (Lazarine, 2006)	50
Tabel 3.5 Material Jaringan Organ Paru (Lazarine, 2006)	50
Tabel 3.6 Material Jaringan Tulang (Lazarine, 2006)	51
Tabel 3.7 Jenis input code cell cards pada MCNP-6 (Armstrong dkk, 2017)	53
Tabel 3.8 Contoh geometri surface cards pada MCNP-6 (Armstrong dkk, 2017).....	54
Tabel 3.9 Nilai Faktor Kualitas Radiasi (Ardana, 2017)	60
Tabel 4.1 Besar Fluks Neutron Konsentrasi Boron 40 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker.....	66
Tabel 4.2 Besar Fluks Neutron Konsentrasi Boron 45 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker.....	66
Tabel 4.3 Besar Fluks Neutron Konsentrasi Boron 50 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker.....	66
Tabel 4.4 Besar Fluks Neutron Konsentrasi Boron 55 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker.....	66
Tabel 4.5 Besar Fluks Neutron Konsentrasi Boron 60 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker.....	67
Tabel 4.6 Laju dosis boron pada konsentrasi 40 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker	67
Tabel 4.7 Laju dosis boron pada konsentrasi 45 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker	67
Tabel 4.8 Laju dosis boron pada konsentrasi 50 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker	68
Tabel 4.9 Laju dosis boron pada konsentrasi 55 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker	68
Tabel 4.10 Laju dosis boron pada konsentrasi 60 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker	68
Tabel 4.11 Waktu iradiasi terhadap <i>Organ at Risk</i> pada konsentrasi 40 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker	69

Tabel 4.12 Waktu iradiasi terhadap <i>Organ at Risk</i> pada konsentrasi 45 μ g/g jaringan kanker.....	69
Tabel 4.13 Waktu iradiasi terhadap <i>Organ at Risk</i> pada konsentrasi 50 μ g/g jaringan kanker.....	69
Tabel 4.14 Waktu iradiasi terhadap <i>Organ at Risk</i> pada konsentrasi 55 μ g/g jaringan kanker.....	69
Tabel 4.15 Waktu iradiasi terhadap <i>Organ at Risk</i> pada konsentrasi 60 μ g/g jaringan kanker.....	69
Tabel 4.16 Nilai ambang dosis serap pada jaringan tubuh (IAEA, 1998).....	83
Tabel 4.17 Dosis serap pada <i>Organ at Risk</i>	84
Tabel 4.18 Parameter Sumber Neutron (IAEA, 2001).....	85

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kode Input MCNP 6.2. untuk Konsentrasi Boron 60 $\mu\text{g/g}$ kanker..	95
Lampiran 2 Perhitungan Fraksi Massa Boron pada tiap Jaringan pada konsentrasi 60 $\mu\text{g/g}$	106
Lampiran 3 Fraksi Dosis Serap Gamma.....	109
Lampiran 4 Perhitungan Laju Dosis.....	110
Lampiran 5 Perhitungan Waktu Iradiasi dan Dosis Serap.....	112



DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

<u>Lambang</u>	<u>Keterangan</u>
A_0	Aktivitas awal radioisotop
D	Dosis serap
\dot{D}	Laju dosis
g	<i>Massa organ</i>
Gy	<i>Gray</i>
h	Konstanta <i>Planck</i>
ρ	Densitas organ
Q	Energi partikel
\dot{R}	Laju pembentukan Hidrogen-2
V	Volume organ
S	Waktu Iradiasi
W	Faktor kualitas radiasi
Φ	Fluks neutron termal
N	Jumlah atom
σ	Tampang lintang mikroskopik serapan
Δ	Koefisien laju dosis serap
ϕ	Fraksi dosis serap gamma

<u>Singkatan</u>	<u>Arti</u>
ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
BNCT	<i>Boron Neutron Capture Therapy</i>
BSH	<i>Sodium Boronocaptate</i>
BPA	<i>Boronophenylalanine</i>
CTV	<i>Clinical Target Volume</i>
DNA	<i>Deoxyribonucleic Acid</i>
EGFR	<i>Epidermal Growth Factor Receptor</i>
GLOBOCAN	<i>Global Cancer Statistic</i>
GCO	<i>Global Cancer Observatory</i>
GTV	<i>Gross Tumour Volume/</i>
H	Hidrogen
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
IXRPC	<i>International X-ray and Radium Protection Committee</i>
LANL	<i>Los Alamos National Laboratory</i>

LET	<i>Linear Energy Transfer</i>
LFS	<i>Li-Fraumeni Syndrome</i>
MCNP	<i>Monte Carlo N Particle</i>
MIRD	<i>Medical Internal Radiation Dose</i>
MRI	<i>Magnetic Resonance Imaging</i>
OAR	<i>Organ at Risk</i>
ORNL	<i>Oak Ridge National Laboratory</i>
PHITS	<i>Particle and Heavy Ion Transport Code System</i>
PTV	<i>Planning Tumour Volume</i>
SCLC	<i>Small Cell Lung Cancer</i>
NSCLC	<i>Non-Small Cell Lung Cancer</i>
TRIGA	<i>Training Research Isotop production/Irradiation General Atomic</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
 YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penyakit kanker merupakan salah satu penyakit tidak menular yang kasusnya termasuk paling banyak di dunia. Munculnya kanker ditandai dengan adanya sel yang abnormal yang bisa berkembang tanpa terkendali dan memiliki kemampuan untuk menyerang dan berpindah antar sel dan jaringan tubuh. Kanker bersifat mematikan dan dapat menyerang siapa saja, baik laki-laki, perempuan, anak-anak maupun dewasa. Penyakit kanker dapat timbul dan disebabkan oleh beberapa hal, seperti: warisan genetik yang termutasi, hormon, virus dan bakteri, masuknya zat yang tidak baik bagi tubuh seperti asap rokok dan minuman beralkohol, dan lain sebagainya.

Menurut data dari *Global Cancer Statistic (GLOBOCAN)*, yang dirilis oleh *International Agency for Research on Cancer (IARC) – World Health Organization (WHO)* pada tahun 2020, jumlah kasus penyakit kanker di dunia mencapai 19,29 juta kasus dengan angka kematian sebanyak 9,96 juta jiwa. Jumlah ini terdiri dari jumlah kasus pada laki-laki sebanyak 10,06 juta dan jumlah kasus pada perempuan sebanyak 9.23 juta. Kasus kanker yang paling banyak terjadi berturut turut adalah kanker payudara, kanker paru, kanker usus besar, kanker prostat, dan kanker perut (Globocan, 2020).

Pada kasus penyakit kanker, jumlah kematian paling banyak terjadi pada kanker paru, menurut data yang dirilis oleh IARC. Data tersebut mencatat kematian akibat kanker paru mencapai lebih dari 1,7 juta jiwa dari kasus yang terjadi di

seluruh dunia, walaupun jumlah kasusnya di bawah kanker payudara. Persebaran kasus kanker paru di Asia juga menempati urutan teratas, dengan kasus kematian sebanyak 1,1 juta jiwa dari 1,3 juta kasus. Jumlah ini adalah jumlah yang terbesar, baik jumlah kasus maupun jumlah kematian. Sementara di Indonesia, tercatat ada 34.783 penyintas kanker paru dengan jumlah kematian sebanyak 30.843 jiwa pada tahun 2020 (GLOBOCAN, 2020).

Kanker paru merupakan salah satu penyakit kanker yang terjadi pada bagian organ paru. Sel kanker yang tumbuh tidak terkendali dalam organ paru, kemudian menyebabkan terbentuknya cairan pada rongga pleura (rongga yang terletak di antara selaput yang melapisi paru-paru dan rongga dada), sehingga menyebabkan pasien mengalami kesulitan bernafas. Selain itu, pasien juga mengalami penurunan daya tahan tubuh yang memperparah kondisi fisiknya (Compton dkk, 2010). Penyintas kanker paru stadium lanjut memiliki masa usia medis yang relatif lebih singkat dibandingkan dengan pasien yang menderita jenis kanker lainnya pada stadium yang sama. Namun demikian, upaya penanganan dalam rangka meningkatkan kualitas kesehatan pasien kanker paru terus dilakukan.

Seseorang dapat dikatakan sembuh dari penyakitnya karena suatu obat, begitu juga dengan kanker. Rasulullah SAW dalam sebuah Hadist yang diriwayatkan oleh Imam Al Bukhori, bersabda:

مَا أَنْزَلَ اللَّهُ دَاءً إِلَّا أَنْزَلَ لَهُ شِفَاءً

“Tidaklah Allah menurunkan penyakit, melainkan Dia pula yang menurunkan obatnya. “(HR. Al-Bukhori).

Hadits ini menjelaskan bahwa terdapat obat di setiap penyakit. Hal ini menunjukkan apabila ingin mencari metode pengobatan suatu penyakit, pasti akan menemukan sebuah obat. Dalam hadits lain, Rasulullah menegaskan perlunya ilmu yang berkaitan dengan dunia medis untuk mempelajari dan mencari obat sebuah penyakit, sebagaimana disampaikan dalam hadist di bawah ini:

حَدَّثَنَا هَارُونُ بْنُ مَعْرُوفٍ وَأَبُو الطَّاهِرِ وَأَحْمَدُ بْنُ عِيسَى قَالُوا
 حَدَّثَنَا ابْنُ وَهْبٍ أَخْبَرَنِي عَمْرُو وَهُوَ ابْنُ الْحَارِثِ عَنْ عَبْدِ رَبِّهِ
 بْنِ سَعِيدٍ عَنْ أَبِي الزُّبَيْرِ عَنْ جَابِرٍ عَنْ رَسُولِ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ
 عَلَيْهِ وَسَلَّمَ أَنَّهُ قَالَ لِكُلِّ دَاءٍ دَوَاءٌ فَإِذَا أُصِيبَ دَوَاءُ الدَّاءِ بَرَأَ
 بِإِذْنِ اللَّهِ عَزَّ وَجَلَّ

“Telah menceritakan kepada kami Harun bin Ma'ruf dan Abu Ath Thahir serta Ahmad bin 'Isa mereka berkata; Telah menceritakan kepada kami Ibnu Wahb; Telah mengabarkan kepadaku 'Amru, yaitu Ibnu al-Harits dari 'Abdu Rabbih bin Sa'id dari Abu Az Zubair dari Jabir dari Rasulullah shallallahu 'alaihi wasallam, beliau bersabda: "Setiap penyakit ada obatnya. Apabila ditemukan obat yang tepat untuk suatu penyakit, akan sembuhlah penyakit itu dengan izin Allah 'azza wajalla." (HR Muslim).

Dari hadist tersebut, ungkapan "setiap penyakit ada obatnya" dapat diartikan sebagai dorongan kepada orang yang sakit dan juga dokter yang mengobatinya, untuk mencari obat dan menyelidikinya. Selain itu, hadits ini mengajak untuk melakukan penelitian tentang obat sebuah penyakit, termasuk penyakit-penyakit mematikan dan berbagai penyakit yang tidak bisa disembuhkan oleh dokter, karena belum ditemukan obatnya. Rasulullah juga menegaskan bahwa obat dari suatu penyakit sudah ada, namun dibutuhkan orang yang bersungguh-sungguh dalam

meneliti, mencari, dan menemukannya. Menurut Ibnu Qayyim, obat diciptakan oleh Allah untuk menyembuhkan suatu penyakit. Namun, pengetahuan terhadap obat-obatan tersebut tidak diperlihatkan di hadapan umat manusia.

Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, terdapat beberapa metode atau cara pengobatan kanker yang sudah ditemukan dan digunakan seperti metode radioterapi, metode pengangkatan sel kanker atau operasi, dan metode kemoterapi. Dokter spesialis kanker paru melakukan tindakan pengobatan/terapi berdasarkan observasi melalui gejala yang muncul, hasil pemeriksaan klinis, dan kondisi daya tahan tubuh pasien. Beberapa tindakan dapat diberikan kepada penderita kanker paru oleh dokter, seperti melakukan pembedahan, radioterapi, kemoterapi, terapi target, dan atau terapi kombinasi (radiasi dan kemoterapi) (Kemenkes, 2017).

Seiring dengan kemajuan zaman, metode pengobatan radioterapi telah banyak digunakan dalam menyembuhkan berbagai penyakit kanker. Metode ini memiliki keuntungan seperti tidak diperlukannya praktek pembedahan atau operasi untuk mengangkat kanker, karena menggunakan radiasi pengion yang terpancar untuk menghancurkan sel kanker. Beberapa jenis radioterapi telah yang ada saat ini diantaranya adalah brakiterapi, *radiosurgery stereotactic*, terapi proton, dan *Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)*. Dari beberapa jenis radioterapi tersebut, BNCT memiliki beberapa kelebihan diantaranya dosis akan terpusat ke dalam sel kanker setelah diinjeksikan ke dalam tubuh dan tidak merusak sel sehat yang ada di sekitarnya. BNCT menggunakan reaksi isotop Boron-10 yang diiradiasi dengan neutron termal/epitermal untuk menghasilkan partikel alpha dan inti Lithium-7.

BNCT adalah jenis radioterapi yang menggunakan nuklida non radioaktif, yaitu Boron yang mempunyai kecenderungan tinggi menangkap neutron berenergi rendah (neutron termal) (Sauerwein, 2012).

Metode BNCT membutuhkan agen pembawa Boron untuk diinjeksikan ke dalam tubuh, yaitu *Sodium Boronocaptate* atau BSH dan *Boronophenylalanine* atau BPA (Sauerwein dkk, 2012). Dalam metode BNCT, Boron terlebih dahulu disuntikkan ke dalam aliran darah yang selanjutnya akan terpusat dalam sel kanker. Tahap selanjutnya adalah iradiasi pada Boron yang terpusat di sel kanker dengan menggunakan neutron energi rendah (neutron termal). Sumber neutron ini berasal dari ekstraksi reaksi fisi unsur Uranium-235 di dalam reaktor nuklir. Saat iradiasi, neutron yang dihasilkan akan menyebabkan reaksi fisi pada atom Boron-10 di dalam sel kanker, sehingga menghasilkan unsur Helium-4 dan Lithium-7. Reaksi fisi juga menghasilkan partikel Alfa, dimana partikel ini digunakan untuk membunuh sel kanker (Gann dkk, 2010).

Perencanaan terapi BNCT sangat menentukan tingkat keberhasilan dalam terapi kanker. Sebelum terapi BNCT berlangsung, para ahli dengan dokter spesialis yang menangani pasien, terlebih dahulu akan melakukan koordinasi, analisis, serta penghitungan dosis BNCT untuk digunakan. Selain itu, juga dilakukan perencanaan dalam penggunaan alat radioterapi. Jika dosis yang diberikan tidak sesuai dengan batas dosis yang dibutuhkan, maka akan berakibat fatal kepada tubuh pasien, seperti munculnya efek radiasi pada tubuh secara stokastik, non stokastik, maupun efek yang langsung mengenai sel genetik (Hidayatullah, 2017). Berkaitan dengan terapi BNCT, dapat dilakukan sebuah simulasi terapi BNCT menggunakan program

Monte Carlo N-Particle atau MCNP. Program ini merupakan *software* permodelan kode transportasi atau aktivitas radiasi yang dibuat dengan tujuan untuk melacak dan memodelkan berbagai jenis aktivitas partikel. Simulasi MCNP dalam prakteknya menggunakan metode stokastik yang disebut *Monte Carlo*. Metode *Monte Carlo* menggunakan sampling probabilitas dari kejadian-kejadian individu peristiwa berturut-turut (dalam hal ini adalah partikel) dan dengan mengikuti setiap siklus hidup partikel, mulai dari tahap produksi hingga tahap kehancuran partikel (Nadinastiti, 2010). Adapun kelebihan dari metode ini adalah kemampuan dalam mensimulasikan berbagai jenis partikel seperti interaksi neutron dengan foton, neutron dengan neutron, dan neutron dengan elektron.

Penelitian mengenai BNCT telah dilakukan dan beberapa diantaranya memanfaatkan simulasi berbasis *Monte Carlo* untuk mensimulasikan dosis radiasi, waktu iradiasi yang optimal, dan lain sebagainya. Penelitian BNCT pada terapi kanker paru telah dilakukan oleh Harish pada tahun 2018, dengan menggunakan simulasi *Particle and Heavy Ion Transport Code System* (PHITS). Hasil dari penelitian ini adalah konsentrasi Boron lebih dari 50 $\mu\text{g/g}$ kanker masih berada dalam batas aman untuk organ paru, karena tidak memiliki efek samping setelah dilakukan terapi. Kemudian, penelitian lain juga telah dilakukan oleh Handayani pada tahun 2021, dengan menggunakan simulasi *Monte Carlo N-Particle X* (MCNP-X). Penelitian ini dilakukan terhadap kanker otak, dimana hasil dari penelitian ini adalah waktu penyinaran yang ideal dengan arah TOP, terhadap kanker otak, membutuhkan waktu selama 11,3 menit. Adapun penelitian lain juga dilakukan oleh Istikomah pada tahun 2017, dengan menggunakan simulasi yang

sama (MCNP-X), mengenai terapi BNCT pada kasus kanker kulit. Salah satu hasil dari penelitian ini adalah jumlah energi kolimator yang digunakan dengan resiko kerusakan paling kecil pada jaringan sehat sebesar 10 MeV, dengan waktu iradiasi 26,6 menit.

Dari berbagai penelitian sebelumnya, maka muncul suatu ide penelitian tentang kajian lebih lanjut mengenai perhitungan dosis boron yang efektif dan waktu iradiasi yang optimum pada kanker paru menggunakan BNCT, dengan metode *Monte Carlo*. Adapun simulasi yang digunakan dalam penelitian ini dengan menggunakan program *Monte Carlo N-Particle 6* (MCNP-6). Ide dari penelitian ini membahas tentang jumlah konsentrasi Boron efektif dan lama waktu iradiasi yang optimum dalam terapi dengan BNCT pada kanker paru.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat bentuk geometri kanker paru dan tubuh manusia yang disimulasikan dengan *software* MCNP-6?
2. Bagaimana menghitung jumlah konsentrasi Boron efektif pada terapi pengobatan kanker paru dengan metode BNCT?
3. Bagaimana menghitung lama waktu iradiasi yang optimal pada terapi pengobatan kanker paru dengan metode BNCT?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Melakukan simulasi pada geometri tubuh manusia, khususnya pada bagian organ paru, dalam terapi pengobatan kanker paru dengan BNCT menggunakan *software* MCNP-6.
2. Menganalisis jumlah konsentrasi Boron efektif pada terapi pengobatan kanker paru dengan metode BNCT menggunakan program simulasi MCNP-6.
3. Menganalisis lama waktu iradiasi yang optimal pada terapi pengobatan kanker paru dengan metode BNCT.

1.4. Batasan Penelitian

Pada penelitian dengan judul “*Simulasi Dosis Boron dan Waktu Iradiasi pada Pengobatan Kanker Paru Dengan Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Menggunakan Software MCNP-6*” ini, terdapat beberapa batasan penelitian sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan program simulasi MCNP versi 6, dengan objek simulasi adalah seluruh tubuh.
2. Kanker yang disimulasikan adalah kanker paru, dimana sel kanker paru terletak di organ paru bagian kanan.
3. Perhitungan konsentrasi Boron meliputi laju dosis alfa, laju dosis proton, laju dosis gamma, dan laju dosis total.
4. Variasi dosis Boron yang disimulasikan pada penelitian ini adalah 40 $\mu\text{g/g}$, 45 $\mu\text{g/g}$, 50 $\mu\text{g/g}$, 55 $\mu\text{g/g}$, dan 60 $\mu\text{g/g}$
5. Penentuan waktu iradiasi dihitung berdasarkan rasio antara besar dosis minimum perusak sel kanker terhadap laju dosis total.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah wawasan tentang penggunaan teknologi BNCT sebagai salah satu metode terapi kanker.
2. Menambah wawasan keilmuan tentang penelitian yang menggunakan simulasi berbasis *Monte Carlo N-Particle* (MCNP).
3. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan pengobatan kanker paru menggunakan BNCT.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dipaparkan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi terapi kanker pada penelitian ini menggunakan desain geometri kanker paru yang terbagi menjadi 3 bagian, yaitu PTV, CTV, dan GTV dengan ukuran diameter kanker sebesar 3 cm. Tampilan desain kanker terletak pada lobus tengah paru-paru bagian kanan. Kemudian desain geometri tubuh manusia yang disimulasikan pada penelitian ini menggunakan phantom yang dibuat oleh ORNL-MIRD.
2. Nilai konsentrasi boron yang efektif dalam penelitian ini adalah sebesar 60 $\mu\text{g/g}$ dengan resiko menimbulkan efek deterministik pada jaringan paru-paru dan jaringan tulang rusuk.
3. Waktu optimal jaringan kanker menyerap fluks neutron selama 1223,679 detik atau 20,4 menit dengan memperhatikan nilai konsentrasi boron efektif pada penelitian ini.

5.2. Saran

Terdapat beberapa saran dari peneliti untuk penelitian selanjutnya, diantaranya sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengembangkan desain kolimator agar *output* fluks neutron sesuai dengan rekomendasi IAEA.

2. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat melakukan simulasi terapi kanker paru menggunakan BNCT dengan membuat variasi energi pada kolimator.



DAFTAR PUSTAKA

- American Cancer Society. 2019. *Lung Cancer*. Atlanta: American Cancer Society.
- Amjad, Muhammad T., A. Chidharla, dan A. Kasi. 2022. *Cancer Chemotherapy*. Diakses 21 Februari 2023 dari https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK564367/#_article-94124_s2_
- Ardana, I Made, A. D. Noerwasana, dan Yohannes Sardjono. 2018. Kajian Teknologi Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) dan Aspek Regulasinya. *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir*. ISSN: 1412-3258 : 95-101
- Armstrong, J., Forrest B. Brown, dan Jeffrey S. Bull. 2017. *MCNP User's Manual Code Version 6.2*. Los Alamos, Los Alamos National Laboratory.
- Batan. 2007. *Buku Panduan Pusat Pendidikan dan Penelitian Petugas Proteksi Radiasi*. Batan: Jakarta.
- Becker, J. 2007. *Simulation of Neutron Production at a Medical Linear Accelerator*. (Thesis Diploma). Universitas Hamburg: Institute of Experimental Physics.
- Carron, N.J.. 2007. *An Introduction to the Passage of Energetic Particles through Matter*. CRC Press. Amerika Serikat.
- Compton, Carolyn C. dan April G. Fritz. 2010. *AJCC Cancer Staging Manual Seventh Edition*. Springer. Chicago.
- Fauziah, Nina, Andang Widi H., dan Yohannes Sardjono. 2013. A Conceptual Design of Neutron Collimator in The Thermal Column of Kartini Research Reactor for In Vitro and In Vivo Test of Boron Neutron Capture Therapy. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*. **Vol. 15 No. 2 Juni 2013** : 112-119.
- Fakhrurreza, M. dan Puput K. Majidah. 2018. Pengaruh Banyaknya Radiasi Dan Perubahan Energi Sinar-X Terhadap Peningkatan Pembentukan Radikal Bebas Pada Air. *Journal of Health Studies*. **Vol. 2 No.1** : 34-40.
- Fitriatuzzakiyyah, Nur, Rano K. Sinuraya, dan Irma M. Puspitasari. 2017. Terapi Kanker dengan Radiasi: Konsep Dasar Radioterapi dan Perkembangannya di Indonesia. *Jurnal Farmasi Klinik Indonesia*. **Vol. 6 No. 4 Desember 2017** : 311-320
- Gann, T., Chih-H. Chang, Wang H, Lee T. 2010. Nanotargeted Radionuclides for Cancer Nuclear Imaging and Internal Radiotherapy. *International Journal of Biomedicine and Biotechnology*. Volume 2010, Article ID 953537, 17 pages doi:10.1155/2010/953537.
- GLOBOCAN, 2020. *Estimated Number of Cancer Incidence, Mortality, and Prevalence Worldwide in 2020*. International Agency of Research for Cancer.

- Goorley, T.. 2013. Features of MCNP6. *Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 201*, **October 2013** : 27-31.
- Handayani, L. Tri. 2017. *Evaluasi Dosis Efektif Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Pada Pengobatan Glioblastoma Multiforme Menggunakan Metode Monte Carlo*. (Skripsi) Program Studi Fisika Departemen Fisika Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro.
- Harish, A.F., 2018. Dose Analysis of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Treatment for Lung Cancer Based on Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS). *ASEAN Journal On Science & Technology for Development Vol. 25 No. 2 2018* : 187-194.
- Hasyim, K., Y. Sardjono, dan Y. Sumardi. 2018. The Dose Analysis Of Boron Neutron Capture Therapy (Bnct) To The Brain Cancer (Glioblastoma Multiform) Using Mcnpx-Code With Neutron Source From Collimated Thermal Column Kartini Research Nuclear. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*, **Vol 3 No 3** : 95-101.
- Hidayatullah, R., 2017. *Dampak Tingkat Radiasi Pada Tubuh Manusia*. *Jurnal Mutiara Elektromedik Vol 1 No 1. November 2017*.
- Husen, Auliya, Ch. Suharti, dan Hardian. 2016. Hubungan Antara Derajat Nyeri dengan Tingkat Kualitas Hidup Pasien Kanker Paru yang Menjalani Kemoterapi. *Jurnal Kedokteran Diponegoro. Vol. 5 No. 4 Oktober 2016* : 545-557.
- IAEA. 2001. *Current Status of Neutron Capture Therapy*. IAEA. Wina.
- IAEA. 2004. *Radiation, People and The Environment*. IAEA. Wina.
- Istkomah. 2017. *Perhitungan Dosimetry Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Pada Kanker Kulit Menggunakan Mcnpx*. (Skripsi) Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2017. *Pedoman Nasional Pelayanan Kedokteran (PNPK) Untuk Kanker Paru*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Jakarta.
- Lazarine, A.D.. 2006. *“Medical Physics Calculation with MCNPTM: A Primer”*. (Thesis), Texas A&M University. Texas, Amerika Serikat.
- Mayo Clinic, 2022. *Lung Cancer*. Diakses 22 Februari 2023 dari <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/lung-cancer/symptoms-causes/syc-20374620>
- Malhotra, J, Matteo Malvezzi dan Eva Negri. 2016. Risk Factors for Lung Cancer Worldwide. *Jurnal Series Thoracic Oncology* : 889-902.

- McConn, R., Gesh, C., Pagh, R., Rucker, R., dan Williams, R. 2011. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling. *Pasific Northwest National Laboratory Vol. 1*. Pasific Northwest National Laboratory. Richland, Washington. <https://doi.org/10.2172/1023125>
- Muslih A, M. Ilma, Yohannes Sardjono, dan Andang Widiharto. 2014. Perancangan Kolimator Di Beam Port Tembus Reaktor Kartini untuk Boron Neutron Capture Therapy. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2014*. ISSN 0216 – 3128 10-14 Juni 2014 : 163-178.
- National Library of Medicine. 2002. *Non-Small Cell Lung Cancer Treatment (PDQ®)*. Diakses 3 Maret 2023 dari <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK65917/>
- Pelowitz, D.B.. 2008. *MCNPXTM User's Manual*. United States Department of Energy.
- Prasetio, Tri Riski, dan Sari Susanti. 2019. Prediksi Harapan Hidup Pasien Kanker Paru Pasca Operasi Bedah Toraks Menggunakan Boosted K-Nearest Neighbor. *Jurnal Responsif Vol. 1 No. 1 Agustus 2019* : 64-69.
- Podgorsak, Ervin B.. 2015. *Radiation Physics for Medical Physicist*. Montreal, Kanada, Springer.
- Quah, S. Chiek. 2018. Boron Neutron Capture Therapy in The Treatment of Lung Cancer. *Journal of Xiangya Medicine Vol. 3 No. 29 23 July 2018* : 1-10.
- Razali, Mutiara Fahmi. 2021. Penggunaan Manusia Sebagai Relawan dalam Ujicoba Obat Baru: Kajian Alquran, Hadis, dan Kaedah Fiqih. *El-Ussrah: Jurnal Hukum Keluarga Vol. 4 No. 1 Januari-Juni 2021* : 64-75.
- Rudin, Charles M., dan Elisabeth Brambilla. 2021. Small-Cell Lung Cancer. *Jurnal Nature Reviews: Disease Primers* : 1-20.
- Rianaris, Agitta. 2011. *Simulasi Penentuan Dosis Serapan Pada Brachytherapy Prostat Menggunakan Software MCNP5*. (Skripsi) Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret.
- Sardjono, Yohannes dan Susilo Widodo. 2016. A Design of Boron Neutron Capture Therapy for Cancer Treatment. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Application Vol. 1 No. 1 Februari 2016* : 1-13.
- Sauerwein, W.A.G., Pierre M. Bet, dan Andrea Wittig. 2012. Drugs for BNCT: BSH and BPA. *Jurnal Neutron Capture Therapy* : 117-140.
- Sauerwein W, Wittig A, Moss R, dan Nakagawa Y. 2012. *Neutron Capture Therapy - Principles and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012. Berlin Heidelberg Jerman. JRC77319.
- Shields, T.W., Reed, C. E., dan LoCicero J.. 2009. *General Thoracic Surgery*. Wolters Kluwer Business. Philadelphia.

- Stabin, Michael G. 2003. *Introduction to Health Physics*. Springer. New York.
- Suzuku, Minoru, Osamu Suzuki, dan Yoshinori Sakurai. 2012. Reirradiation For Locally Recurrent Lung Cancer in The Chest Wall with Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). *Internasional Cancer Conference*. Springer.
- Syamputra, Dhani Nur Indra. 2018. *Analisis Dosis Pengobatan BNCT pada Kanker Rhabdomyosarcoma Di Kepala Dan Leher Dengan PHITS*. (Skripsi) Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta.
- Tesalonika, Adrian, Andang W. Harto, dan Yohannes Sardjono. 2016. Dosimetry of in vitro and in vivo Trials in Thermal Column Kartini Reactor for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) facility by using MCNPX Simulator Code. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*. **Vol. 1 No. 2 Juni 2016** : 63-72.
- Yeung, A.W.K.. 2019. The “As Low As Reasonably Achievable” (ALARA) Principle: A Brief Historical Overview and A Bibliometric Analysis of The Most Citerd Publications. *Societe Francaise de Radioprotection*. **Vol. 54 No. 2 2019** : 103-109