

**PENENTUAN DISTRIBUSI DOSIS DALAM TERAPI
KANKER KOLOREKTUM DENGAN *BORON*
NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) BERBASIS
PHITS 3.30**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh derajat Sarjana S1
Program Studi Fisika



Diajukan oleh :
Tika Ayu Ariyanti
19106020019

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

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



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-2282/Un.02/DST/PP.00.9/08/2023

Tugas Akhir dengan judul : Penentuan Distribusi Dosis dalam Terapi Kanker Kolorektum dengan Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Berbasis PHITS 3.30

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : TIKA AYU ARIYANTI
Nomor Induk Mahasiswa : 19106020019
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
Prof. Ir. Yohannes Sardjono, APU
SIGNED

Valid ID: 64e6babe1e78b



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

Valid ID: 64e437e031311



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

Valid ID: 64e69fa912f08



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

Valid ID: 64e6d83691491

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tika Ayu Ariyanti
NIM : 19106020019
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Penentuan Distribusi Dosis dalam Terapi Kanker Kolorektum dengan *Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)* Berbasis PHITS 3.30” 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, 7 Agustus 2023

Penulis



Tika Ayu Ariyanti
NIM. 19106020019



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 : Tika Ayu Ariyanti
NIM : 19106020019
Judul Skripsi : Penentuan Distribusi Dosis dalam Terapi Kanker Kolorektum dengan *Boron Neutron Therapy (BNCT)* Berbasis PHITS 3.30

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.

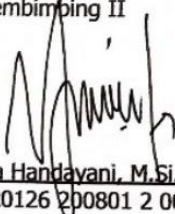
Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

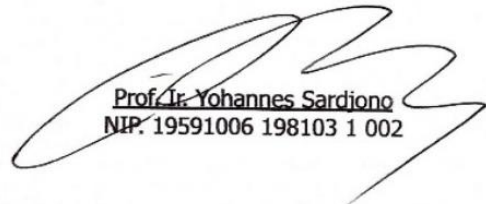
Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 7 Agustus 2023

Pembimbing I

Pembimbing II


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


Prof. Ir. Yohannes Sardjono
NIP. 19591006 198103 1 002

MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S Al-Insyirah : 5)

“In the end, some of your greatest pain, will become your greatest strength”.

-Yoongi of BTS

“Everything you lose is a step you take”.

-Taylor Swift

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadiran Allah SWT. yang tidak pernah berhenti memberikan karunia dan hidayah sehingga dengan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Penentuan Distribusi Dosis Dalam Terapi Kanker Kolorektum Dengan *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) Berbasis Phits 3.30” dengan segala kemudahan-Nya. Sholawat serta salam tak lupa tercurahkan kepada nabi besar kita, Nabi Muhammad SAW. beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya di yaumul akhir. Keberhasilan dalam penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari segala bentuk semangat dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
 2. Kedua orang tua dan adik-adik tercinta yang tanpa henti memberi dukungan dan do'anya.
 3. Bapak Prof. Dr. Phil. Al Makin, S.Ag., M.A. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
 4. Ibu Dr. Khurul Wardati, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
 5. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Program Studi Fisika.
- Semoga diberikan kesehatan dan kekuatan dalam menjalankan amanah.

6. Bapak Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa memberi arahan dan masukan selama penulis menempuh pendidikan ini.
7. Bapak Prof. Yohannes Sardjono selaku Dosen Pembimbing I yang bersedia membimbing penulis dalam tugas akhir ini.
8. Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa memberikan motivasi, masukan, arahan, dan nasihat selama penulis menempuh pendidikan sampai terselesaikannya tugas akhir ini.
9. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Fisika yang telah membagikan ilmunya dan terus memberi semangat.
10. Teman-teman Fisika Angkatan 2019, terutama Raissa, ‘Aini, Minami dan Fafa yang telah berjuang bersama dalam suka maupun duka selama menempuh pendidikan.
11. Serta tujuh paus ungu yang telah menemani dan bernyanyi bersama selama tujuh tahun lamanya. *Let's go to the beautiful blue sea together and always trust in our 52 hertz.*

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu diharapkan kritik dan saran dengan terbuka. Penulis berharap adanya tugas akhir ini dapat menambah inspirasi sekaligus wawasan bagi para pembaca. Aamiin.

Wassalamu’alaikum. Wr. Wb.

**PENENTUAN DISTRIBUSI DOSIS DALAM TERAPI KANKER
KOLOREKTUM DENGAN *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY*
(BNCT) BERBASIS PHITS 3.30**

**Tika Ayu Ariyanti
19106020019**

INTISARI

Metode *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) merupakan salah satu solusi dari tingginya tingkat kematian akibat kanker, khususnya kanker kolorektum. BNCT sangat efektif untuk terapi kanker, sebab mampu menghancurkan sel kanker secara selektif. Tujuan dari penelitian ini di antaranya untuk menganalisis pengaruh konsentrasi Boron terhadap laju dosis total dan waktu iradiasi, serta menentukan dosis yang diterima organ berisiko di sekitar kanker. Penelitian ini dilakukan dengan metode Monte Carlo melalui simulasi penyinaran kanker kolorektum menggunakan *Particle and Heavy Ion Transport Code System* (PHITS) versi 3.30. Konsentrasi boron yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 50, 75, 100, 125 dan 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker. Penyinaran neutron dilakukan dengan tiga arah penyinaran yakni dari arah samping kiri (*Left-Lateral - LLAT*), arah belakang (*Posterior-Anterior - PA*), dan arah depan (*Anterior-Posterior - AP*). Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Boron menyebabkan laju dosis total semakin tinggi dan waktu iradiasi menjadi semakin singkat. Konsentrasi Boron yang optimal adalah sebesar 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker, karena mampu memberikan laju dosis tertinggi dan waktu iradiasi tersingkat. Dengan konsentrasi Boron tersebut, arah penyinaran efektif dalam penelitian ini yakni melalui arah penyinaran depan (AP) dengan laju dosis total sebesar $1,90\text{E-}2$ Gy/s dan waktu iradiasi tersingkat selama 43 menit. Selain itu, dosis yang diterima organ berisiko masih berada dalam batas aman dosis. Organ berisiko yang sangat dekat dengan kanker adalah usus besar, usus kecil dan lambung secara berurutan menerima dosis sebesar 4,45 Gy.Eq, 2,11 Gy.Eq dan 0,79 Gy.Eq.

KATA KUNCI: *Kanker Kolorektum, Dosis Boron, BNCT, Waktu iradiasi, PHITS*

***DETERMINATION OF DOSAGE DISTRIBUTION WITHIN COLORECTAL
CANCER TREATMENT BY BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY
(BNCT) BASED ON PHITS 3.30***

Tika Ayu Ariyanti
19106020019

ABSTRACT

The Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) method is one of the solutions to the high mortality rate caused by cancer, especially for colorectal cancer. BNCT is highly effective in cancer therapy as it can selectively destroy cancer cells. The purposes of this research include analyzing the influence of Boron concentration on the total dose rate and irradiation time, as well as determining the doses received by organs at risk surrounding the cancer. This research was conducted using the Monte Carlo method through the simulating the irradiation of colorectal cancer using the Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) version 3.30. The Boron concentrations used in this research were 50, 75, 100, 125, and 150 $\mu\text{g/g}$ of cancer tissue. Neutron irradiation was performed from three directions: from the left side (Left-Lateral - LLAT), the back of the body (Posterior-Anterior - PA), and front of the body (Anterior-Posterior (AP). The results of the simulation show that an increase in Boron concentration leads to a higher total dose rate and shorter irradiation time. The optimal Boron concentration is 150 $\mu\text{g/g}$ of cancer tissue, as it provides the highest dose rate and shortest irradiation time. With that Boron concentration, the most effective irradiation direction in this research is through front (AP) direction, with a total dose rate of $1.90\text{E-}2$ Gy/s and the shortest irradiation time of 43 minutes. Furthermore, the doses received by organs at risk are still within safe limits. The organs at risk that are in close to the cancer are the large intestine, small intestine, and stomach, each receiving doses 24,45 Gy.Eq, 2,11 Gy.Eq and 0,79 Gy.Eq.

Keywords: *Colorectum Cancer, Boron Dose, BNCT, Irradiation Time, PHITS*

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR	iv
MOTTO	v
KATA PENGANTAR	vi
INTISARI	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Batasan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Studi Pustaka	8
2.2 Landasan Teori	13
2.2.1 Kanker Kolorektum.....	13
2.2.2 <i>Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)</i>	16
2.2.3 Dosimetri.....	22
2.2.4 Siklotron.....	24
2.2.5 <i>Particle Heavy and Ion Transport System (PHITS)</i>	28

BAB III METODE PENELITIAN	32
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	32
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	32
3.2.1 Perangkat Keras	32
3.2.2 Perangkat Lunak.....	33
3.2.3 Bahan.....	33
3.3 Tahapan Penelitian	33
3.3.1 Studi Pustaka.....	34
3.3.2 Pengumpulan Data	35
3.3.3 Pemodelan Geometri <i>Phantom</i> dan BSA.....	35
3.3.4 Pembuatan <i>File Input Final</i> PHITS	36
3.3.5 <i>Running</i> PHITS	37
3.3.6 <i>Output</i> PHITS	37
3.3.7 Analisis Hasil <i>Output</i>	38
3.4 Metode Analisis Data	39
3.4.1 Analisis Geometri <i>Phantom</i> Organ dan Kanker.....	39
3.4.2 Laju Dosis Total.....	40
3.4.3 Waktu Iradiasi	41
3.4.4 Dosis yang Diterima Organ Berisiko	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1 Hasil Penelitian.....	42
4.1.1 Geometri <i>Phantom</i> Organ dan <i>Beam Shaping Assembly</i>	42
4.1.2 Laju Dosis Total.....	43
4.1.3 Waktu Iradiasi	45
4.1.4 Dosis yang Diterima Organ Berisiko	45

4.2	Pembahasan	46
4.2.1	Geometri <i>Phantom</i> Organ dan <i>Beam Shaping Assembly</i>	48
4.2.2	Laju Dosis Total	53
4.2.3	Waktu Iradiasi	56
4.2.4	Dosis yang Diterima Organ Berisiko	58
4.3	Integritas-Interkoneksi.....	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		62
5.1	Kesimpulan.....	62
5.2	Saran	63
DAFTAR PUSTAKA		64
LAMPIRAN.....		75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Referensi penelitian terdahulu.....	12
Tabel 2.2 Rekomendasi berkas neutron IAEA.....	28
Tabel 3.1 Jadwal penelitian.....	32
Tabel 3.2 Spesifikasi alat yang digunakan dalam penelitian.....	32
Tabel 3.3 Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian.....	33
Tabel 3.4 Bahan yang digunakan dalam penelitian.....	33
Tabel 3.5 Faktor bobot radiasi.....	41
Tabel 4.1 Laju dosis total pada GTV melalui arah penyinaran LLAT.....	44
Tabel 4.2 Laju dosis total pada GTV melalui arah penyinaran PA.....	44
Tabel 4.3 Laju dosis total pada GTV melalui arah penyinaran AP.....	45
Tabel 4.4 Waktu iradiasi berdasarkan variasi arah penyinaran dan konsentrasi Boron.....	45
Tabel 4.5 Dosis yang diterima organ berisiko untuk Boron 150 µg/g jaringan kanker.....	46
Tabel 4.6 Beberapa bagian BSA yang dimodifikasi.....	49
Tabel 4.7 Karakteristik berkas neutron dari hasil optimasi BSA yang dilakukan.....	52
Tabel 4.8 Batas dosis dan efek deterministik yang dapat ditimbulkan.....	60

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Statistik kasus baru dan kematian akibat kanker di 185 negara	1
Gambar 1.2 Jumlah kematian akibat kanker di Indonesia pada tahun 2020	2
Gambar 2.1 Anatomi organ manusia.....	13
Gambar 2.2 Faktor risiko pemicu kanker kolorektum.....	14
Gambar 2.3 Pertumbuhan polip berdasarkan stadium kanker.....	15
Gambar 2.4 Mekanisme penghancuran sel kanker dalam BNCT	18
Gambar 2.5 Peluruhan isotop Boron-11	19
Gambar 2.6 Perusakan DNA dalam BNCT.....	21
Gambar 2.7 Agen pembawa Boron	22
Gambar 2.8 Prinsip kerja siklotron.....	25
Gambar 2.9 Akselerator berbasis BNCT di Jepang.....	27
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	34
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian dalam PHITS	38
Gambar 4.1 Hasil pemodelan geometri phantom, (a) secara 3D (b) secara 2D ..	42
Gambar 4.2 Hasil pemodelan geometri BSA secara dua dimensi (2D)	43
Gambar 4.3 Visualisasi penyinaran, (a) dari samping kiri (LLAT), (b) dari arah belakang (PA), (c) dari arah depan (AP)	47
Gambar 4.4 Hasil CT scan pasien kanker kolorektum yang ditunjukkan oleh anak panah berwarna kuning.....	48
Gambar 4.5 Hasil pemodelan geometri kanker terdiri dari GTV (kuning), CTV (hijau), dan PTV (ungu).....	48
Gambar 4.6 Distribusi fluks neutron terhadap kedalaman phantom air	50
Gambar 4.7 Distribusi fluks neutron terhadap kedalaman phantom (IAEA, 2001)	51
Gambar 4.8 Distribusi fluks neutron terhadap kedalaman phantom organ	52
Gambar 4.9 Grafik laju dosis total pada jaringan kanker atau GTV	55
Gambar 4.10 Grafik waktu iradiasi berdasarkan arah penyinaran dan konsentrasi Boron	57
Gambar 4.11 Hubungan jarak terhadap jumlah paparan radiasi	58

Gambar 4.12 Pengaruh variasi arah penyinaran terhadap dosis ekuivalen organ 59

Gambar 4.13 Pengaruh besar konsentrasi Boron terhadap dosis ekuivalen tiap organ 60



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I. Material Penyusun Geometri <i>Phantom</i>	75
Lampiran II. Section yang digunakan dalam PHITS	75
Lampiran III. Laju Dosis Total dengan Arah Penyinaran LLAT	76
Lampiran IV. Laju Dosis Total dengan Arah Penyinaran PA	78
Lampiran V. Laju Dosis Total dengan Arah Penyinaran AP	80
Lampiran VI. Dosis Ekuivalen yang Diterima Organ Berisiko	82
Lampiran VII. Spesifikasi siklotron HM-30	83
Lampiran VIII. Listing Pengkodean PHITS	83
Lampiran IX. Curriculum Vitae	97

DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH

AB-BNCT	= <i>Accelerator-Based BNCT</i>
AP	= <i>Anterior-Posterior</i>
BNCT	= <i>Boron Neutron Capture Therapy</i>
BPA	= <i>Boronophenylalanine</i>
BSA	= <i>Beam Shaping Assembly</i>
BSH	= <i>Borocaptate sodium</i>
CBE	= <i>Compound Biological Effectiveness</i>
CTV	= <i>Clinical Target Volume</i>
GBM	= <i>Glioblastoma Multiforme</i> (Tumor Ganas Otak)
GTV	= <i>Gross Tumour Volume</i>
Gy	= Gray (Satuan turunan dosis radiasi pengion)
ICRP	= <i>International Commission on Radiological Protection</i>
LET	= <i>Linear Energy Transfer</i>
LLAT	= <i>Left Lateral</i>
ORNL	= <i>Oak Ridge National Laboratory</i>
PA	= <i>Posterior-Anterior</i>
PHITS	= <i>Particle Heavy and Ion Transport System</i>
PTV	= <i>Planning Target Volume</i>
RBE	= <i>Relative Biological Effectiveness</i>

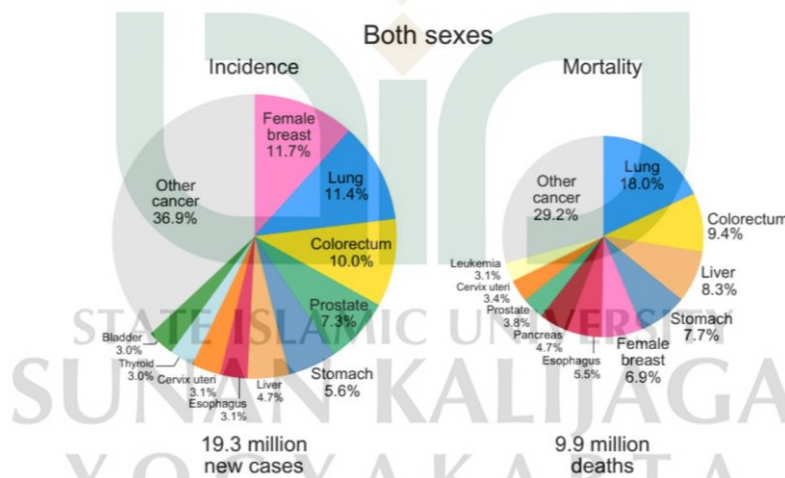
STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

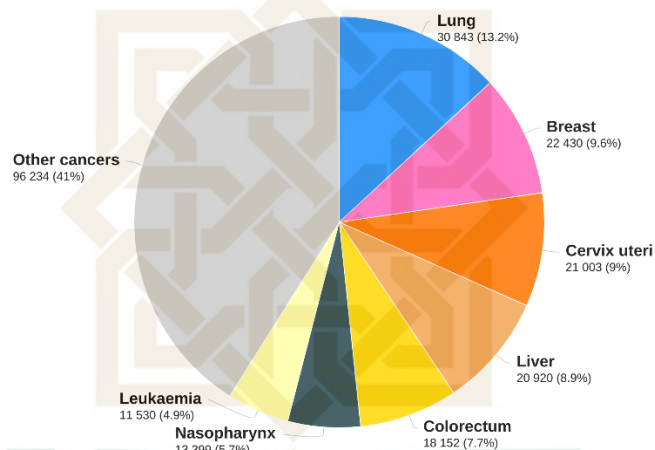
Kanker menjadi penyebab utama kematian di seluruh dunia. Menurut *World Health Organization* (WHO), terdapat sekitar 10 juta kematian yang terjadi pada tahun 2020. Jumlah tersebut diprediksi akan meningkat menjadi 28,4 juta kasus kejadian kanker pada tahun 2040 (Sung dkk., 2021). Kanker sendiri adalah penyakit yang ditandai dengan adanya pertumbuhan dan penyebaran sel abnormal secara tak terkendali, sehingga dapat menyebabkan kematian jika tidak segera ditangani (American Cancer Society, 2023). Kanker yang paling umum diderita di semua kalangan baik pria atau wanita adalah kanker kolorektum.



Gambar 1.1 Statistik kasus baru dan kematian akibat kanker di 185 negara (Sung dkk., 2021)

Gambar 1.1 menunjukkan bahwa kasus kematian kanker menempati urutan kedua dengan total sebanyak sekitar 935.000 kematian (Sung dkk., 2021). Statistik kanker kolorektum di atas kurang akurat karena terdapat kesalahan pengklasifikasian dalam kasus kematian. Kebanyakan kematian akibat kanker rektum diidentifikasi sebagai kanker usus besar. Hal ini terjadi karena penggunaan

kata usus besar lebih baik secara bahasa daripada dengan kata rektum (American Cancer Society, 2023). Di Indonesia, kanker kolorektum menempati urutan kelima sebagai kasus kanker terbanyak seperti yang tersaji dalam Gambar 1.2. Berdasarkan gambar tersebut, kasus kematian akibat kanker kolorektum terjadi di Indonesia sebanyak 18.152 atau sekitar 7.7%.



Gambar 1.2 Jumlah kematian akibat kanker di Indonesia pada tahun 2020 (<http://gco.iarc.fr/>)

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk melihat perkembangan kanker kolorektum di Indonesia. Mayoritas penderita kanker kolorektum adalah pria dengan rata-rata berada pada stadium III ditemukan dalam beberapa penelitian (Astuti dkk., 2019; Makmun dkk., 2021; Yusuf dkk., 2021). Penelitian yang dilakukan Makmun dkk. (2021) di Rumah Sakit Cipto Mangunkusumo, Jakarta, menunjukkan sebagian besar pasien mengidap kanker di bagian kiri, khususnya kanker pada *descending colon* menempati urutan ketiga dengan total sebanyak 26 kasus.

مَا أَنْزَلَ اللَّهُ دَاءً إِلَّا أَنْزَلَ لَهُ شِفَاءً

Artinya; “Tidaklah Allah menurunkan suatu penyakit, melainkan ketika itu juga Allah menurunkan obatnya/penawarnya” (H.R. Imam Bukhari, Nomor 5354).

Berdasarkan hadits di atas, dapat disimpulkan bahwa setiap penyakit pasti ada obatnya. Sama halnya dengan kanker yang dapat diobati. Manusia hanya perlu berikhtiar selama proses penyembuhan dan Allah yang akan memutuskan sembuh atau tidaknya. Manusia tidak boleh hanya berserah diri tanpa mencoba berusaha.

Metode penanganan terhadap penyakit kanker terus dikembangkan, di antaranya adalah kemoterapi, radioterapi, terapi hormon, hingga pembedahan. Tiap metode memiliki kekurangannya tersendiri. Contohnya adalah kemoterapi dapat membuat rambut rontok serta diare. Sementara pembedahan hanya dilakukan apabila kanker sudah berkembang dan radioterapi dapat merusak jaringan sehat di sekitarnya (Kim dkk., 2014).

Penggabungan beberapa metode penanganan bertujuan untuk mengurangi efek samping yang ditimbulkan serta untuk meningkatkan efisiensi metode demi hasil yang baik. Metode *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) merupakan solusi untuk permasalahan tersebut (Pramusinta dkk., 2017). Metode ini mampu membunuh sel tumor secara selektif (Purohit & Kumar, 2022). BNCT memanfaatkan reaksi nuklir yang ditimbulkan ketika isotop Boron stabil (Boron-10) disinari dengan neutron termal yang berenergi rendah (Irhas dkk., 2014). Metode BNCT memanfaatkan partikel alfa dan ${}^7\text{Li}$ yang dihasilkan melalui reaksi ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ untuk membunuh sel kanker (Malouff dkk., 2021).

Publikasi jurnal maupun artikel tentang pemanfaatan BNCT untuk menangani kanker kolorektum khususnya kanker usus besar masih tergolong sedikit. Penelitian yang dilakukan oleh Wittig dkk., (2009) menunjukkan bahwa penggunaan BNCT untuk kanker usus besar masih berada dalam tahap uji klinis

fase I. Protokol EORTC 11001 merupakan uji coba fase 1 dengan tujuan untuk mengukur serapan dua senyawa Boron yaitu *borocaptate sodium* (BSH) dan *Boronophenylalanine* (BPA) dalam jaringan tubuh serta darah.

Dalam penanganan radioterapi diperlukan perencanaan terapi atau disebut juga dengan *Treatment Planning System* (TPS) dengan tujuan agar pengobatan tepat sasaran dan mengurangi kerusakan pada jaringan sehat (Baltas & Zamboglou, 2006). Penentuan dosis terapi organ tubuh sangat diperlukan untuk menilai potensi risiko radiasi serta menjaga keselamatan pasien.

Metode Monte Carlo telah menunjukkan kemampuan yang signifikan untuk studi optimasi dalam radiologi diagnostik, fisika radiasi dan dosimetri. Penentuan dosimetri radiasi dengan metode Monte Carlo dilakukan melalui simulasi program komputasi. Saat ini terdapat dua kode Monte Carlo yang umum digunakan dalam simulasi transportasi radiasi yaitu *Monte Carlo N-Particle* (MCNP) (Goorley dkk., 2012; James dkk., 2014) dan *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS) (Iwamoto dkk., 2017; Sato dkk., 2015, 2018). Penelitian terkait penentuan dosis terapi kanker berbasis *software* simulasi telah banyak dilakukan (Harish dkk., 2020; Jalut dkk., 2020; Zabihzadeh dkk., 2021). Hasil dari ketiga penelitian tersebut menunjukkan bahwa *software* simulasi dapat menggambarkan distribusi dosis terapi dalam jaringan tiruan dengan baik.

Sementara itu terdapat penelitian yang telah dilakukan untuk menentukan dosis terapi BNCT pada kanker kolorektum (Agusnin, 2021; Muhaimi, 2022). Penelitian Agusnin (2021) berupa analisis dosis BNCT pada kanker usus besar tepatnya pada bagian *ascending*. Sementara penelitian Muhaimi (2022) yang

berupa analisis dosis BNCT pada kanker rektum. Kedua penelitian menunjukkan hasil yang sama bahwa konsentrasi Boron paling efektif untuk merusak sel kanker dengan cepat sebesar 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker.

Penelitian yang dilakukan oleh Agusnin (2021) dan Muhaimi (2022) memiliki kekurangan karena terjadi *bug* selama pembuatan *phantom*. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya fitur yang memadai dalam *software* PHITS versi 3.26. Fitur yang berfungsi untuk mendeteksi *error* seperti bentuk yang tidak terdefinisi dalam geometri *phantom* hanya tersedia dalam PHITS versi 3.30. Berdasarkan penelitian Makmun dkk. (2021), dapat diketahui bahwa kanker yang terjadi pada bagian *descending* menempati urutan ketiga terbanyak diderita oleh laki-laki. Merujuk pada permasalahan tersebut, maka akan dilakukan penelitian untuk menganalisis distribusi dosis BNCT pada kanker kolorektum tepatnya pada bagian *descending* menggunakan *software* PHITS versi 3.30.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana simulasi terapi BNCT untuk kanker kolorektum dengan variasi tiga arah penyinaran melalui *software* PHITS 3.30?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi Boron terhadap laju dosis total yang diterima?
3. Bagaimana pengaruh konsentrasi Boron terhadap lamanya waktu iradiasi?
4. Bagaimana menentukan dosis terapi yang diterima jaringan kanker dan organ di sekitarnya?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan di antaranya :

1. Melakukan simulasi terapi BNCT untuk kanker kolorektum dengan variasi tiga arah penyinaran melalui *software* PHITS 3.30.
2. Menganalisis pengaruh konsentrasi Boron terhadap laju dosis total yang diterima dalam terapi kanker kolorektum.
3. Menganalisis pengaruh konsentrasi Boron terhadap lamanya waktu iradiasi dalam terapi kanker kolorektum.
4. Menentukan dosis terapi yang diterima jaringan kanker dan organ di sekitarnya.

1.4 Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki batasan masalah di antaranya :

1. Jenis kanker yang diteliti adalah kanker kolorektum dengan stadium IIIB, di mana kanker terletak pada usus besar bagian *descending*.
2. Konsentrasi Boron yang digunakan yaitu 50, 75, 100, 125, 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker.
3. Sumber neutron yang digunakan berasal dari siklotron 30 MeV.
4. Ukuran serta bentuk geometri organ manusia mengikuti *phantom Oak Ridge National Laboratory* (ORNL), sementara komposisi material penyusun organ mengikuti ICRP 145.
5. Organ berisiko yang diteliti adalah usus besar, usus kecil, hati, lambung, pankreas, ginjal, dan kandung kemih.
6. Jumlah partikel yang disimulasikan sebanyak 100 juta.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat sebagai berikut :

1. Sebagai referensi dalam pemberian dosis BNCT dalam terapi kanker kolorektum.
2. Mengembangkan pemanfaatan BNCT dalam bidang medis khususnya dalam terapi kanker kolorektum.
3. Mengembangkan pemanfaatan *software* simulasi PHITS dalam penentuan dosis radiasi pada terapi kanker dengan BNCT.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Simulasi terapi kanker kolorektum yang terletak di *descending colon* pada stadium IIIB dengan metode BNCT berbasis *software* PHITS versi 3.30 berhasil dilakukan. Hasil simulasi berupa geometri *phantom* dengan organ berisiko yakni usus besar, usus kecil, hati, lambung, pankreas, ginjal, kandung kemih, dan testes serta geometri BSA yang telah dimodifikasi. Selain itu simulasi dengan tiga arah penyinaran berhasil dilakukan dengan tidak ditemukannya *error*. Hasil yang diperoleh berupa gambar yang menunjukkan visualisasi dari tiga arah penyinaran.
2. Variasi konsentrasi Boron mempengaruhi nilai laju dosis total. Semakin besar konsentrasi Boron yang diinjeksikan, maka semakin tinggi nilai laju dosis total. Laju dosis total tertinggi terdapat pada jaringan GTV melalui arah penyinaran depan (AP). Hasil paling optimal diperoleh dengan konsentrasi Boron 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker yaitu sebesar $1,90\text{E}-2$ Gy/s.
3. Waktu iradiasi semakin singkat dengan bertambahnya konsentrasi Boron yang diinjeksikan. Waktu iradiasi tersingkat diperoleh melalui arah penyinaran depan (AP). Konsentrasi Boron sebesar 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker memiliki waktu iradiasi optimal selama 43 menit.

4. Dosis yang diterima organ berisiko berhasil ditentukan. Dosis ekuivalen yang diterima organ berisiko berada di bawah batas aman apabila disimulasikan melalui arah penyinaran depan (AP) dengan konsentrasi Boron sebesar 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker. Dosis yang diterima beberapa organ berisiko dengan arah penyinaran depan (AP) seperti usus besar, usus kecil dan lambung masing-masing sebesar 4,45 Gy.Eq, 2,11 Gy.Eq dan 0,79 Gy.Eq. Dosis yang diterima oleh tiap jaringan lainnya dengan arah penyinaran depan (AP) dapat dilihat pada Tabel 4.5.

5.2 Saran

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

1. Disarankan dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menyimulasikan terapi kanker kolorektum dengan jumlah partikel lebih dari 100 juta partikel. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan banyaknya kebolehdjian reaksi antara partikel dengan jaringan, sehingga akan mempengaruhi dosis yang diterima organ berisiko.
2. Proses running simulasi penyinaran dengan 100 juta partikel memerlukan waktu sekitar 3-4 jam apabila menggunakan komputer dengan prosesor intel core-7 generasi ke-7 dan RAM 8GB. Maka disarankan menggunakan komputer dengan prosesor keluaran terbaru dan RAM yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Agusnin, H. K. 2021. *Analisis Dosis Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Pada Kanker Kolon Dengan Particle and Heavy Ions Transport Code System (PHITS)*. (Tugas Akhir), Jurusan Fisika, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Ali, F., S Hosmane, N., & Zhu, Y. 2020. Boron Chemistry for Medical Applications. *Molecules*, **Vol.25 No.4** : 828. <https://doi.org/10.3390/molecules25040828>
- Alzahrani, S. M., Al Doghaither, H. A., & Al-Ghafar, A. B. 2021. General insight into cancer: An overview of colorectal cancer (review). *Molecular and Clinical Oncology*, **Vol.15 No.6**. <https://doi.org/10.3892/MCO.2021.2433>
- American Cancer Society. 2023. *Cancer Facts and Figures 2023*. Diakses 1 Maret 2023 dari <https://www.cancer.org/research/cancer-facts-statistics/all-cancer-facts-figures/2023-cancer-facts-figures.html>
- Amerongen, H. M. 2018. Anatomy and Histology of the Digestive Tract. Dalam *Comprehensive Toxicology* (hlm. 3–15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.02118-8>
- Ardana, I. M., Kusminarto, K., & Sardjono, Y. 2015. Optimization Of Collimator Design For BNCT Based Cyclotron 30 Mev And Its Dosimetry Simulation In Head And Neck Soft Tissue Sarcoma Using Monte Carlo N Particle X Program. *Proceedings of International Symposium on BNCT : The Application of Nuclear Technology to Support National Sustainable Development : Health, Agriculture, Energy, Industry and Environment*.
- Ardana, I. M., Noerwasana, A., & Sardjono, Y. 2021. *Kajian Teknologi Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)*.
- Astuti, N., Rafli, R., & Zeffira, L. 2019. Profil dan Kesintasan Penderita Kanker Kolorektal di RSUP Dr. M. Djamil Padang. *Health & Medical Journal*, **Vol.1** : 45–49. <https://doi.org/10.33854/heme.v1i1.218>

- Azzouz, L. L., & Sharma, S. 2022. *Physiology, Large Intestine*.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507857/>
- Baltas, D., & Zamboglou, N. 2006. 2D and 3D Planning in Brachytherapy. Dalam W. Schlegel, T. Bortfeld, & A.-L. Grosu (Ed.), *New Technologies in Radiation Oncology* (hlm. 237–254). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/3-540-29999-8_19
- BAPETEN. (2010). *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2010 Tentang Pemantauan Kesehatan Untuk Pekerja Radiasi*.
- Birnbaum, E. 2017. Surgical Anatomy of the Colon, Rectum, and Anus. Dalam *Colon, Rectum and Anus: Anatomic, Physiologic and Diagnostic Bases for Disease Management* (hlm. 9–19). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-09807-4_4
- Health Professional Fact Sheet. Tanpa tahun. *Boron*. Diakses 22 Agustus 2023 dari
<https://ods.od.nih.gov/factsheets/Boron-HealthProfessional/>
- Cheng, X., Li, F., & Liang, L. 2022. Boron Neutron Capture Therapy: Clinical Application and Research Progress. *Current Oncology*, **Vol.29 No.10** : 7868–7886. <https://doi.org/10.3390/curroncol29100622>
- Cristy, M. 1985. *Mathematical phantoms for use in reassessment of radiation doses to Japanese atomic-bomb survivors*. <https://doi.org/10.2172/5252724>
- Dekker, E., Tanis, P. J., Vleugels, J. L. A., Kasi, P. M., & Wallace, M. B. 2019. Colorectal cancer. *The Lancet*, **Vol.394 No.10207** : 1467–1480.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)32319-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)32319-0)
- Dorostkar, M. M., Rasouli, F. S., & Salehkoutahi, S. M. 2022. A simulation study on proton accelerator-based sources for BNCT of shallow tumors. *Progress in Nuclear Energy*, **Vol. 153** : 104444.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104444>

- Fielding, A. L. 2023. Monte-Carlo techniques for radiotherapy applications I: introduction and overview of the different Monte-Carlo codes. *Journal of Radiotherapy in Practice*, **Vol.22** : e80. <https://doi.org/10.1017/S1460396923000079>
- Fisher, D. R., & Fahey, F. H. 2017. Appropriate Use of Effective Dose in Radiation Protection and Risk Assessment. *Health Physics*, **Vol.113 No.2** : 102–109. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000674>
- Fukuda, H. 2021. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for Cutaneous Malignant Melanoma Using ¹⁰B-p-Boronophenylalanine (BPA) with Special Reference to the Radiobiological Basis and Clinical Results. *Cells*, **Vol.10 No.11** : 2881. <https://doi.org/10.3390/cells10112881>
- Furuta, T., & Sato, T. 2021. Medical application of particle and heavy ion transport code system PHITS. *Radiological Physics and Technology*, **Vol.14 No.3** : 215–225. <https://doi.org/10.1007/s12194-021-00628-0>
- Goorley, T., James, M., Booth, T., Brown, F., Bull, J., Cox, L. J., Durkee, J., Elson, J., Fensin, M., Forster, R. A., Hendricks, J., Hughes, H. G., Johns, R., Kiedrowski, B., Martz, R., Mashnik, S., McKinney, G., Pelowitz, D., Prael, R., ... Zukaitis, T. 2012. Initial MCNP6 Release Overview. *Nuclear Technology*, **Vol.180 No.3** : 298–315. <https://doi.org/10.13182/NT11-135>
- Goto, A., Tachikawa, T., Jongen, Y., & Schillo, M. 2014. Cyclotrons. Dalam *Comprehensive Biomedical Physics*, **Vol.8** : 179–195. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53632-7.00612-2>
- Harish, A. F., Warsono, & Sardjono, Y. 2020. 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 and Technology for Development*, **Vol.35 No.3** : 187–194. <https://doi.org/10.29037/ajstd.545>

- He, H., Li, J., Jiang, P., Tian, S., Wang, H., Fan, R., Liu, J., Yang, Y., Liu, Z., & Wang, J. 2021. The basis and advances in clinical application of boron neutron capture therapy. *Radiation Oncology*, **Vol.16 No.1** : 216. <https://doi.org/10.1186/s13014-021-01939-7>
- Hendricks, J. S., Swinhoe, M. T., & Favalli, A. 2022. *Monte Carlo N-Particle Simulations for Nuclear Detection and Safeguards*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-04129-7>
- Hu, N., Tanaka, H., Kakino, R., Yoshikawa, S., Miyao, M., Akita, K., Aihara, T., Nihei, K., & Ono, K. 2022. Improvement in the neutron beam collimation for application in boron neutron capture therapy of the head and neck region. *Scientific Reports*, **Vol.12 No.1** : 13778. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17974-7>
- Huang, L., Xu, X., Shao, J., Hong, W., & Yu, W. 2022. Efficacy of Laparoscopic Radical Resection Combined with Neoadjuvant Chemotherapy and Its Impact on Long-Term Prognosis of Patients with Colorectal Cancer. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, **Vol.2022** : 4774531. <https://doi.org/10.1155/2022/4774531>
- IAEA. 2022. Applications of Accelerators and Other Sources of Ionizing Radiation. Dalam *IAEA Bulletin* (hlm. 1–40). www.iaea.org/bulletin
- IAEA, V. 2001. *Current status of neutron capture therapy*. <https://doi.org/https://doi.org/>
- ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, **Vol.37 No.2–4** : 9–34. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
- Irhas, Harto, A. W., & Sardjono, Y. 2014. *Dosimetry Boron Neutron Capture Therapy in Liver Cancer with Sodium Boroncaptate as Boron Carrier using MCNP Calculation Software*.

- Iwamoto, Y., Sato, T., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Matsuda, N., Hosoyamada, R., & Niita, K. 2017. Benchmark study of the recent version of the PHITS code. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **Vol.54 No.5** : 617–635. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1297742>
- Jahromi, N. G. 2020. Primary Squamous Cell Carcinoma of the Descending Colon. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.8588>
- Jalut, L. L. S., Rupiasih, N. N., & Sardjono, Y. 2020. Analisis Dosis Boron pada Teknik BNCT dengan Metode Simulasi Menggunakan Program PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System) Analysis of Boron Dose on BNCT Technique with Simulation Methods Using the PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System) Program. *Buletin Fisika*, **Vol.21 No.1 Februari 2020** : 1-7.
- James, M., Pelowitz, D., Fallgren, A., McMath, G., Booth, T., Brown, F., Bull, J., Cox, L., Elson, J., Durkee, J., Fensin, M., Forster, R., Goorley, J., Hendricks, J., Hughes, H., Johns, R., Kiedrowski, B., Mckinney, G., Martz, R., & Zukaitis, A. 2014. *MCNP6TM User's Manual. Code Version 6.1.1 Beta*.
- Jin, W. H., Seldon, C., Butkus, M., Sauerwein, W., & Giap, H. B. 2022. A Review of Boron Neutron Capture Therapy: Its History and Current Challenges. *International Journal of Particle Therapy*, **Vol.9 No.1** : 71–82. <https://doi.org/10.14338/IJPT-22-00002.1>
- Kim, C. H., Yeom, Y. S., Petoussi-Henss, N., Zankl, M., Bolch, W. E., Lee, C., Choi, C., Nguyen, T. T., Eckerman, K., Kim, H. S., Han, M. C., Qiu, R., Chung, B. S., Han, H., & Shin, B. 2020. ICRP Publication 145: Adult Mesh-Type Reference Computational Phantoms. *Annals of the ICRP*, **Vol.49 No.3** : 13–201. <https://doi.org/10.1177/0146645319893605>
- Kim, J. H. 2018. Three principles for radiation safety: time, distance, and shielding. *The Korean Journal of Pain*, **Vol.31 No.3** : 145–146. <https://doi.org/10.3344/kjp.2018.31.3.145>

- Kim, J. H., Jenrow, K. A., & Brown, S. L. 2014. Mechanisms of radiation-induced normal tissue toxicity and implications for future clinical trials. *Radiat Oncol J*, **Vol.32 No.3** : 103–115. <https://doi.org/10.3857/roj.2014.32.3.103>
- Krstic, D., & Nikezic, D. 2011. Debugging of ORNL Series of Mathematical Phantoms of Human Body. *Acta Physica Polonica A*, **Vol.119 No.3** : 279–281. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.119.279>
- Lakkim, V., Reddy, M. C., Prasad, D. V. R., & Lomada, D. 2017. Role of STAT3 in Colorectal Cancer Development. Dalam *Role of Transcription Factors in Gastrointestinal Malignancies* (hlm. 269–298). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6728-0_19
- Li, G., Jiang, W., Zhang, L., Chen, W., & Li, Q. 2021. Design of Beam Shaping Assemblies for Accelerator-Based BNCT With Multi-Terminals. *Frontiers in Public Health*, **Vol.9**. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2021.642561>
- Long, J. M. 2013. Radiation Protection. Dalam *Radiation Therapy for Skin Cancer* (hlm. 37–44). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6986-5_4
- Makmun, D., Simadibrata, M., Abdullah, M., Syam, A. F., Shatri, H., Fauzi, A., Renaldi, K., Maulahela, H., Utari, A. P., Pribadi, R. R., Muzellina, V. N., & Nursyirwan, S. A. 2021. Colorectal cancer patients in a tertiary hospital in Indonesia: Prevalence of the younger population and associated factors. *World Journal of Clinical Cases*, **Vol.9 No.32** : 9804–9814. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v9.i32.9804>
- Malouff, T. D., Seneviratne, D. S., Ebner, D. K., Stross, W. C., Waddle, M. R., Trifiletti, D. M., & Krishnan, S. 2021. Boron Neutron Capture Therapy: A Review of Clinical Applications. Dalam *Frontiers in Oncology*, **Vol. 11**. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.601820>

- Mechetin, G. V., & Zharkov, D. O. 2023. DNA Damage Response and Repair in Boron Neutron Capture Therapy. *Genes*, **Vol.14 No.1** : 127. <https://doi.org/10.3390/genes14010127>
- Mitsumoto, T., Yajima, S., Tsutsui, H., Ogasawara, T., Fujita, K., Tanaka, H., Sakurai, Y., & Maruhashi, A. 2013. Cyclotron-based neutron source for BNCT. *AIP Conference Proceedings*, 319–322. <https://doi.org/10.1063/1.4802341>
- Morris, G. M., Micca, P. L., Rezvani, M., Hopewell, J. W., & Coderre, J. A. (2001). Boron neutron capture therapy: effects of split dose and overall treatment time. *Journal of Neuro-Oncology*, **Vol.52 No.2** : 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1010689822493>
- Muhaimi, A. 2022. *Analisis Dosis Radiasi Pada Terapi Kanker Rektum Berbasis Boron Neutron Capture Therapy Menggunakan Program PHITS 3.24*. (Tugas Akhir), Jurusan Fisika, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Naito, F. 2018. Introduction to accelerators for boron neutron capture therapy. *Therapeutic Radiology and Oncology*, **Vol.2** : 54–54. <https://doi.org/10.21037/tro.2018.10.11>
- Norton, I. 2023. *Boron Neutron Capture Therapy: When Drugs and Neutrons Combine* - Cosylab. Diakses 30 Juli 2023 dari <https://www.cosylab.com/2023/03/17/boron-neutron-capture-therapy-when-drugs-and-neutrons-combine/>
- Ntoy, S. G., & Sardjono, Y. 2017. Calculation Of BNCT Dosimetry For Brain Cancer Based On KartiniI Research Reactor Using PHITS Code. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, **Vol.19 No.3** : 159. <https://doi.org/10.17146/tm.2017.19.3.3634>
- Paquet, F., Etherington, G., Bailey, M. R., Leggett, R. W., Lipsztein, J., Bolch, W., Eckerman, K. F., & Harrison, J. D. 2015. ICRP Publication 130: Occupational

Intakes of Radionuclides: Part 1. *Annals of the ICRP*, **Vol.44 No.2** : 5–188.
<https://doi.org/10.1177/0146645315577539>

Petoussi-Henss, N., Bolch, W. E., Eckerman, K. F., Endo, A., Hertel, N., Hunt, J., Pelliccioni, M., Schlattl, H., & Zankl, M. 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. *Annals of the ICRP*, **Vol.40 No.2–5** : 1–257.
<https://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.10.001>

Postuma, I., González, S., Herrera, M. S., Provenzano, L., Ferrarini, M., Magni, C., Protti, N., Fatemi, S., Vercesi, V., Battistoni, G., Anselmi Tamburini, U., Hao Liu, Y., Kankaanranta, L., Koivunoro, H., Altieri, S., & Bortolussi, S. 2021. A Novel Approach to Design and Evaluate BNCT Neutron Beams Combining Physical, Radiobiological, and Dosimetric Figures of Merit. *Biology*, **Vol.10 No.3** : 174. <https://doi.org/10.3390/biology10030174>

Pramusinta, R., Sardjono, S., & Sumardi, Y. 2017. Analisis Dosis Pada Kanker Payudara Dengan BNCT Menggunakan MCNPX Dengan Sumber Neutron Generator. *Jurnal Fisika*, **Vol.6 No.2**

Purohit, M., & Kumar, M. 2022. Boron neutron capture therapy: History and recent advances. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.181>

Rathva, B., & Desai, S. V. 2020. Colorectal cancer: Etiology, pathogenesis and current treatment. *Journal of Innovations in Pharmaceutical and Biological Sciences*, **Vol.7 No.4** : 20–24.
<https://jipbs.com/index.php/journal/article/view/399>

Sajad, K., Elnaz, E., Dariush, S., Sepideh Yazdani, D., & Marzieh, K. 2022. Boron neutron capture therapy for the treatment of lung cancer and assessment of dose received by organs at risk. *Archives of Pathology and Clinical Research*, **Vol.6 No.1** : 027–031. <https://doi.org/10.29328/journal.apcr.1001032>

- Salimoglu, S., Kilinc, G., & Calik, B. 2021. Anatomy of the Colon, Rectum, and Anus. Dalam *Colon Polyps and Colorectal Cancer* (hlm. 1–22). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57273-0_1
- Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Tsai, P.-E., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L., & Niita, K. 2018. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **Vol.55 No.6** : 684–690. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>
- Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Furuta, T., Noda, S., Ogawa, T., Iwase, H., Nakashima, H., Fukahori, T., Okumura, K., Kai, T., Chiba, S., & Sihver, L. 2015. Overview of particle and heavy ion transport code system PHITS. *Annals of Nuclear Energy*, **Vol.82** : 110–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.023>
- Shinji, S., Yamada, T., Matsuda, A., Sonoda, H., Ohta, R., Iwai, T., Takeda, K., Yonaga, K., Masuda, Y., & Yoshida, H. 2022. Recent Advances in the Treatment of Colorectal Cancer: A Review. *Journal of Nippon Medical School*, **Vol.89 No.3** : 246–254. https://doi.org/10.1272/jnms.JNMS.2022_89-310
- Skwierawska, D., López-Valverde, J. A., Balcerzyk, M., & Leal, A. 2022. Clinical Viability of Boron Neutron Capture Therapy for Personalized Radiation Treatment. *Cancers*, *14*(12), 2865. <https://doi.org/10.3390/cancers14122865>
- Stanford Medicine. 2023. *Colon Cancer*. Diakses 21 Maret 2023 dari <https://stanfordhealthcare.org/medical-conditions/cancer/colon-cancer.html>
- Sukaryono. 2015. Kajian Jenis-jenis Dosimeter Pada Fasilitas Iradiator. *Proceeding on the Scientific Meeting and Presentation on Accelerator Technology and Its Applications*, 123. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:47082713

- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & 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*, **Vol.71 No.3** : 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- Suzuki, M. 2020. Boron neutron capture therapy (BNCT): a unique role in radiotherapy with a view to entering the accelerator-based BNCT era. *International Journal of Clinical Oncology*, **Vol.25 No.1** : 43–50. <https://doi.org/10.1007/s10147-019-01480-4>
- Tam, S. Y., & Wu, V. W. C. 2019. A Review on the Special Radiotherapy Techniques of Colorectal Cancer. *Frontiers in Oncology*, **Vol.9**. <https://doi.org/10.3389/fonc.2019.00208>
- Timmerman, R. D. 2008. An Overview of Hypofractionation and Introduction to This Issue of Seminars in Radiation Oncology. *Seminars in Radiation Oncology*, **Vol.18 No.4** : 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.semradonc.2008.04.001>
- Tsoufanidis, N., Tsoufanidis, N., & Landsberger, S. 2015. *Measurement and Detection of Radiation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18203>
- Waters, K. M., Kim, S. A., & Guindi, M. 2020. Colon and Rectum; Anatomy and Development. Dalam *Encyclopedia of Gastroenterology* (hlm. 587–593). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.65625-8>
- Wittig, A., Collette, L., Moss, R., & Sauerwein, W. A. 2009. Early clinical trial concept for boron neutron capture therapy: A critical assessment of the EORTC trial 11001. *Applied Radiation and Isotopes*, **Vol.67 No.7–8** : S59–S62. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.03.012>
- Xi, Y., & Xu, P. 2021. Global colorectal cancer burden in 2020 and projections to 2040. *Translational Oncology*, **Vol.14 No.10** : 101174. <https://doi.org/10.1016/j.tranon.2021.101174>

- Yamada, S., Takiyama, H., Isozaki, Y., Shinoto, M., Makishima, H., Yamamoto, N., & Tsuji, H. 2021. Carbon-ion Radiotherapy for Colorectal Cancer. *Journal of the Anus, Rectum and Colon*, **Vol.5 No.2** : 113–120. <https://doi.org/10.23922/jarc.2020-082>
- Yusuf, I., Pardamean, B., Baurley, J. W., Budiarto, A., Miskad, U. A., Lusikooy, R. E., Arsyad, A., Irwan, A., Mathew, G., Suriapranata, I., Kusuma, R., Kacamarga, M. F., Cenggoro, T. W., McMahan, C., Joyner, C., & Pardamean, C. I. 2021. Genetic risk factors for colorectal cancer in multiethnic Indonesians. *Scientific Reports*, **Vol.11 No.1** : 9988. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88805-4>
- Zabihzadeh, M., Rahimli, F., Behrooz, M. A., Danyaei, A., & Shahbazian, H. 2021. Evaluation of Dose Distribution in Lung Tumor Radiotherapy with Boron Neutron Capture Therapy. *Iranian Journal of Medical Physics*, **Vol.18 No.1** : 63–69. <https://doi.org/10.22038/ijmp.2019.40980.1586>

