

**PENENTUAN DISTRIBUSI DOSIS PADA KANKER  
LAMBUNG DENGAN MODALITAS TERAPI BNCT  
(*BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY*)  
MENGUNAKAN *SOFTWARE* PHITS VERSI 3.341**

**TUGAS AKHIR**

Untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh derajat sarjana S-1

Program Studi Fisika



diajukan oleh:

Dini Ely Elvina

20106020013

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

**PROGRAM STUDI FISIKA**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA**

**YOGYAKARTA**

**2024**



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-1606/Un.02/DST/PP.00.9/08/2024

Tugas Akhir dengan judul : PENENTUAN DISTRIBUSI DOSIS PADA KANKER LAMBUNG DENGAN MODALITAS TERAPI BNCT (BORON NEUTRON CAPTURE TERAPI) MENGGUNAKAN SOFTWARE PHITS VERSI 3.341

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : DINI ELY ELVINA  
Nomor Induk Mahasiswa : 20106020013  
Telah diujikan pada : Kamis, 22 Agustus 2024  
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: 66cc02b23a757



Penguji I

Andi, M.Sc.  
SIGNED

Valid ID: 66cbec5b9ea7f



Penguji II

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

Valid ID: 66cae6946e99d



Yogyakarta, 22 Agustus 2024

UIN Sunan Kalijaga  
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 66cc2b675eed



### 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 : DINI ELY ELVINA  
NIM : 20106020013  
Judul Skripsi : Penentuan Distribusi Dosis Pada Kanker Lambung dengan Modalitas Terapi BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*) Menggunakan *Software*PHITS Versi 3.341

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, 15 Agustus 2024

Pembimbing II

Dr. Nita Han Hyani, S.Si., M.Si  
NIP. 19800126 200801 2 008

Pembimbing I

Prof. Ir. Yohannes Sardjono, APU, NIP.  
NIP. 195906101981031002

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dini Ely ELvina  
NIM : 20106020013  
Program Studi : Fisika  
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “ Penentuan Distribusi Dosis Pada Kanker Lambung dengan Modalitas Terapi BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*) Menggunakan *Software* PHITS Versi 3.341” 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, 15 Agustus 2024

Penulis



Dini Ely Elvina

NIM. 20106020013

## HALAMAN MOTTO

*“Belajar adalah proses tanpa akhir, tidak ada yang tidak mungkin jika kita mau berusaha, dengan usaha dan doa segala impian bisa dicapai”*

*Perjuangan mu saat ini adalah kesuksesan mu di masa depan*

*Aamiin....*

*(Penulis)*

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## HALAMAN PERSEMBAHAN

*Dengan mengucapkan syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT. yang telah memberikan kekuatan, kesabaran dan ketekunan dalam mengerjakan tugas akhir ini, karya ini*

*saya persembahkan untuk:*

*Ibu saya Yuli Rahmini yang senantiasa sabar, selalu memberikan semangat, motivasi untuk tidak pernah menyerah, memberikan perhatian yang lebih, selalu memberikan kasih sayang dan tidak pernah lupa untuk mendoakan kesuksesan dan yang terbaik untuk anak-anaknya.*

*Adik saya Gigih Dwicatur Hardiansyah yang sama-sama berjuang menggapai cita-cita dan menjadi kebanggaan keluarga.*

*Teman sekaligus sahabat terbaik saya Rizwan Chandra Wijaya yang selalu memberikan semangat, motivasi, dan membantu memperlancar tugas akhir saya.*

*Kepada Ibu dan Bapak Dosen Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah memberikan ilmunya dan mendidik saya menjadi mahasiswa yang lebih baik, semoga ilmu yang diberikan akan menjadi bermanfaat untuk banyak orang.*

*Seluruh teman-teman Program Studi Fisika angkatan 2020 khususnya SC Biofisika dan Fisika Medis semoga bisa menggapai cita-citanya dan sukses didunia kerja maupun usaha yang ditekuni.*

*Almamater Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta*

## KATA PENGANTAR

*Assalaamu'alaikum Wr. Wb.*

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan keselamatan, kemudahan, dan kekuatan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir ini dengan judul “Penentuan Distribusi Dosis Pada Kanker Lambung Dengan Modalitas Terapi BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*) Menggunakan *Software* PHITS Versi 3.341”.

Dalam penulisan tugas akhir ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan sampai penyusunan tugas akhir ini hingga selesai. Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Allah SWT. Yang telah memberikan penulis kesehatan dalam melaksanakan tugas akhir ini sampai dengan selesai.
2. Orang tua, adik, dan pasangan yang tanpa henti memberikan support, motivasi dan do'anya kepada penulis.
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 UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta. Semoga senantiasa diberikan kesehatan, panjang umur dan kekuatan dalam menjalankan amanah

6. Ibu Dr. Widayanti, S.Si. M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa memberikan arahan dan masukan selama penulis menempuh pendidikan S1.
7. Bapak Prof. Ir. Yohannes Sardjono, APU. Selaku Dosen Pembimbing I dari BRIN yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membimbing kami dalam menyelesaikan tugas akhir.
8. Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si. Selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membimbing kami dalam memberikan arahan, masukan, dan motivasi dalam menyelesaikan tugas akhir.
9. Bapak Ir. Isman MT dan bapak Gede Sutrisna Wijaya Selaku motivator dan penasehat dari BRIN yang senantiasa meluangkan waktunya untuk memotivasi dan menasehati kami.
10. Teman seperjuangan tugas akhir yaitu Muliasa Insani Rahmah
11. Serta semua teman yang tidak bisa disebutkan satu persatu, terima kasih telah berkontribusi membantu mengajarkan ilmunya

Demikian, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini memiliki banyak sekali kekurangan. Penulis terbuka dan menerima setiap kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak. Akhir kata, penulis berharap tugas akhir ini bisa bermanfaat bagi para pembaca, khususnya bagi mahasiswa/i UIN Sunan kalijaga Yogyakarta.

*Wassalaamu'alaikum Wr. Wb.*



**PENENTUAN DISTRIBUSI DOSIS PADA KANKER LAMBUNG DENGAN  
MODALITAS TERAPI BNCT (*BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY*)  
MENGUNAKAN *SOFTWARE* PHITS VERSI 3.341**

**Dini Ely Elvina  
20106020013**

**INTISARI**

*Boron Neutron Capture Therapy* merupakan modalitas terapi yang menjanjikan dengan kerusakan maksimal pada jaringan kanker (GTV) dan dosis radiasi minimal pada jaringan sehat. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan waktu iradiasi tersingkat dengan variasi sudut dan menentukan dosis yang tepat untuk menghancurkan sel kanker lambung dengan kerusakan jaringan sehat minimal menggunakan metode BNCT berbasis *software* PHITS versi 3.341. Penelitian dilakukan dengan variasi sudut penyinaran neutron pada 0°, 30°, 45°, 60°, dan 90° serta konsentrasi Boron 20, 40, 60, 80, dan 100 µg/g jaringan. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi Boron 100 µg/g dan sudut penyinaran neutron 0° menghasilkan waktu tersingkat sebesar 26,97 menit dengan laju dosis pada GTV sebesar  $3,12 \cdot 10^{-2}$  Gy/s, sedangkan waktu iradiasi terlama tercatat 104,71 menit pada sudut penyinaran neutron 90°. Pada OAR, dengan konsentrasi Boron 100 µg/g dan sudut penyinaran neutron 0°, dosis radiasi yang diterima masing-masing kulit, lambung, tulang rusuk, hati, sumsum tulang belakang, usus halus dan ginjal berturut-turut adalah 150, 674, 255, 117, 34, 111, 220 ( $10^{-2}$  Gy.Eq).

**Kata kunci:** BNCT, Waktu Penyinaran, Kanker Lambung, PHITS, Dosis

***DETERMINING DOSAGE DISTRIBUTION IN GASTRIC CANCER WITH  
BNCT (BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY) THERAPY MODALITY  
USING PHITS SOFTWARE VERSION 3.341***

**Dini Ely Elvina  
20106020013**

***ABSTRACT***

*Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) is a promising therapeutic modality that maximizes damage to cancerous tissues (GTV) while minimizing radiation exposure to healthy tissues. This study aims to optimize the shortest irradiation time by varying angles and to determine the appropriate dose for destroying stomach cancer cells with minimal damage to healthy tissues using the BNCT method based on PHITS software version 3.341. The research was conducted by varying the neutron irradiation angles at 0°, 30°, 45°, 60°, and 90°, as well as Boron concentrations of 20, 40, 60, 80, and 100 µg/g of tissue. The results indicated that a Boron concentration of 100 µg/g and a neutron irradiation angle of 0° produced the shortest irradiation time of 26.97 minutes, with a dose rate at the GTV of  $3.12 \cdot 10^{-2}$  Gy/s. In contrast, the longest irradiation time was recorded at 104.71 minutes with a neutron irradiation angle of 90°. For the OAR, with a Boron concentration of 100 µg/g and a neutron irradiation angle of 0°, the radiation doses received by the skin, stomach, ribs, liver, spinal cord, small intestine, and kidneys were 150, 674, 255, 117, 34, 111, and 220 ( $10^{-2}$  Gy.Eq), respectively.*

***Keywords:*** BNCT, Exposure Time, Gastric Cancer, PHITS, Dose

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>.....</b>
<b>PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....</b>	<b>i</b>
<b>SURAT PERSETUJUAN TUGAS AKHIR .....</b>	<b>ii</b>
<b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....</b>	<b>iii</b>
<b>HALAMAN MOTTO .....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>INTISARI .....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH .....</b>	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Batasan Penelitian .....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	7
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>8</b>
2.1 Studi Pustaka .....	8
2.2 Landasan Teori .....	10
2.2.1 Kanker Lambung .....	10
2.2.2 Metode Radiodiagnostik.....	10
2.2.3 Metode Radioterapi.....	12
2.2.4 Prosedur BNCT.....	14

2.2.5 Senyawa Boron pada BNCT.....	16
2.2.6 Sumber Neutron.....	17
2.2.7 Interaksi Neutron dengan Materi.....	19
2.2.8 Dosimetri BNCT.....	21
2.2.9 Simulasi PHITS.....	26
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>28</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	28
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	28
3.3 Prosedur Penelitian.....	29
3.3.1 Studi Pustaka.....	30
3.3.2 Pembuatan Kode <i>Input</i> Program PHITS.....	31
3.3.3 Pembuatan Geometri Organ dan Kanker Lambung.....	32
3.3.4 Pembuatan Optimasi BSA.....	35
3.3.5 Pembuatan Gabungan <i>File Input</i> BSA dengan Phantom.....	36
3.3.6 Analisis Hasil Penelitian.....	39
3.4 Metode Analisis Data.....	40
3.4.1 Distribusi Dosis Pada Kanker dan Dosis yang Diterima OAR.....	40
3.4.2 Waktu Iradiasi.....	45
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>46</b>
4.1 Hasil Penelitian.....	46
4.1.1 Geometri <i>Phantom</i> dan Kanker Lambung.....	46
4.1.2 Waktu Iradiasi.....	48
4.1.3 Dosis yang diterima OAR.....	54
4.2 Pembahasan.....	55
4.2.1 Geometri Kanker Lambung, <i>Phantom</i> dan BSA.....	55
4.2.2 Waktu Iradiasi.....	60
4.2.3 Dosis yang diterima OAR.....	62
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>65</b>
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	65

**DAFTAR PUSTAKA..... 67**  
**LAMPIRAN..... 76**



STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
**SUNAN KALIJAGA**  
YOGYAKARTA

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Referensi penelitian terbaru .....	9
<b>Tabel 2.2</b> Karakteristik dari target Litium dan Berilium pada akselerator proton.....	17
<b>Tabel 2.3</b> Karakteristik berkas neutron rekomendasi IAEA TECDOC-1223.....	19
<b>Tabel 2.4</b> Faktor bobot radiasi .....	25
<b>Tabel 2.5</b> Nilai faktor bobot.....	25
<b>Tabel 2.6</b> Faktor bobot jaringan.....	26
<b>Tabel 3.1</b> Perangkat keras.....	29
<b>Tabel 3.2</b> Perangkat lunak .....	29
<b>Tabel 3.3</b> Parameter <i>surface</i> .....	33
<b>Tabel 4.1</b> Laju dosis BNCT arah penyinaran neutron sudut $0^\circ$ .....	49
<b>Tabel 4.2</b> Laju dosis BNCT arah penyinaran neutron sudut $30^\circ$ .....	50
<b>Tabel 4.3</b> Laju dosis BNCT arah penyinaran neutron sudut $45^\circ$ .....	51
<b>Tabel 4.4</b> Laju dosis BNCT arah penyinaran neutron sudut $60^\circ$ .....	52
<b>Tabel 4.5</b> Laju dosis BNCT arah penyinaran neutron sudut $90^\circ$ .....	53
<b>Tabel 4.6</b> Waktu iradiasi arah penyinaran neutron sudut $0^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ , $60^\circ$ , dan $90^\circ$ ...	54
<b>Tabel 4.7</b> Dosis ekuivalen yang terima untuk OAR dari beberapa sudut yaitu $0^\circ$ , $30^\circ$ , $45^\circ$ , $60^\circ$ , dan $90^\circ$ .....	55
<b>Tabel 4.8</b> Hasil optimasi BSA dengan variasi ketebalan <i>shielding</i> gamma.....	56
<b>Tabel 4.9</b> Batas dosis ambang radiasi .....	64

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Citra kanker menggunakan a) <i>esofagogastroduodenoskopi</i> b) PET-CT scan (Chun dkk., 2018) .....	1
<b>Gambar 1.2</b> Kasus kanker diseluruh dunia menurut <i>Global Cancer Observatory</i> a) semua jenis kelamin b) perempuan c) laki laki (Sung dkk., 2021) .....	2
<b>Gambar 2.1</b> Pendefinisian GTV, CTV, dan PTV .....	15
<b>Gambar 2.2</b> Skema produksi neutron pada BNCT hingga sampai kepada pasien (Jin dkk., 2022) .....	18
<b>Gambar 2.3</b> Berkas neutron yang melewati target (Tsoulfanidis, 2015) .....	20
<b>Gambar 3.1</b> <i>Flowchart</i> penelitian secara umum.....	30
<b>Gambar 3.2</b> <i>Flowchart</i> studi pustaka.....	31
<b>Gambar 3.3</b> <i>Flowchart</i> pembuatan kode <i>Input</i> .....	32
<b>Gambar 3.4</b> <i>Flowchart</i> pembuatan phantom .....	34
<b>Gambar 3.5</b> <i>Flowchart</i> pembuatan BSA .....	36
<b>Gambar 3.6</b> <i>Flowchart</i> pembuatan gabungan file <i>Input</i> geometri dan BSA .....	38
<b>Gambar 3.7</b> <i>Flowchart</i> analisis hasil .....	39
<b>Gambar 3.8</b> <i>Input t-track</i> untuk perhitungan laju dosis neutron pada BNCT .....	41
<b>Gambar 3.9</b> <i>Input t-track</i> untuk perhitungan laju dosis Boron pada BNCT.....	42
<b>Gambar 3.10</b> <i>Input t-track</i> untuk perhitungan laju dosis proton pada BNCT .....	43
<b>Gambar 3.11</b> <i>Input t-track</i> untuk perhitungan laju dosis gamma pada BNCT .....	44
<b>Gambar 4.1</b> Visualisasi citra dari geometri phantom ORNL beserta kanker a) sagital b) koronal c) aksial d) bentuk kanker secara 3 dimensi .....	47
<b>Gambar 4.2</b> Replikasi BSA yang sudah dioptimasi.....	48
<b>Gambar 4.3</b> Visualisasi arah penyinaran neutron sudut $0^{\circ}$ .....	49
<b>Gambar 4.4</b> Visualisasi arah penyinaran neutron sudut $30^{\circ}$ .....	50
<b>Gambar 4.5</b> Visualisasi arah penyinaran neutron sudut $45^{\circ}$ .....	51
<b>Gambar 4.6</b> Visualisasi arah penyinaran neutron sudut $60^{\circ}$ .....	52
<b>Gambar 4.7</b> Visualisasi arah penyinaran neutron sudut $90^{\circ}$ .....	53

<b>Gambar 4.8</b> Visualisasi arah penyinaran neutron a) sudut 0° b) sudut 30° c) sudut 45° d) sudut 60° e) sudut 90°.....	59
<b>Gambar 4.9</b> Visualisasi fluks neutron a) sudut 0°, b) sudut 30°, c) sudut 45°, d) sudut 60°, e) sudut 90°.....	60
<b>Gambar 4.10</b> Hubungan laju dosis dengan arah penyinaran di setiap konsentrasi Boron .....	61
<b>Gambar 4.11</b> Hubungan waktu iradiasi neutron dengan konsentrasi Boron di tiap arah penyinaran sudut.....	61
<b>Gambar 4.12</b> Hubungan dosis ekuivalen dengan konsentrasi Boron pada arah penyinaran sudut 0° .....	63
<b>Gambar 4.13</b> Hubungan dosis ekuivalen dengan arah sudut penyinaran pada setiap konsentrasi Boron 100 µg/g.....	64





## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran I.</b> Bahan yang digunakan .....	76
<b>Lampiran II.</b> Parameter <i>input</i> .....	77
<b>Lampiran III.</b> Geometri <i>phantom</i> .....	78
<b>Lampiran IV.</b> Laju dosis .....	79
<b>Lampiran V.</b> Dosis ekuivalen .....	89
<b>Lampiran VI.</b> <i>Listing</i> program .....	92
<b>Lampiran VII.</b> Grafik dosis ekuivalen .....	116
<b>Lampiran VIII.</b> <i>Curriculum Vitae</i> .....	119



STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH

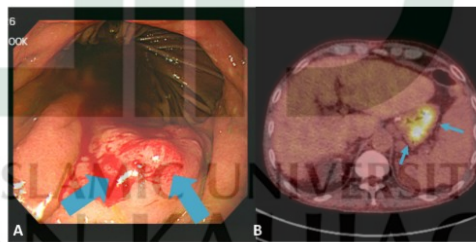
$^{18}\text{F}$ -FDG	: <i>Fluorine-Fluorodeoxyglucose</i>
AP	: <i>Anteroposterior</i>
BNCT	: <i>Boron Neutron Capture Therapy</i>
BPA	: <i>Boronophenylalanine</i>
BSA	: <i>Beam Shapping Assembly</i>
BSH	: <i>Borocaptate Sodium</i>
CBE	: <i>Compound Biologica Effectiveness</i>
CBE	: <i>Compound relative Biological Effectivness</i>
CT	: <i>Computed Tomography</i>
CTV	: <i>Clinical Target Volume</i>
DNA	: <i>Deoxyribonucleic Acid</i>
FLUKA	: <i>Fluktuierende Kaskade</i>
GEANT 4	: <i>Geometry and Tracking 4</i>
GLOBOCAN	: <i>Global Cancer Observatory</i>
GTV	: <i>Gross Tumor Volume</i>
Gy.Eq	: <i>Gray equivalent</i>
IAEA	: <i>International Atomic Energy Agency</i>
ICRP	: <i>International Commission on Radiological Protection</i>
JAEA	: <i>Japan Atomic Energy Agency</i>
KERMA	: <i>Kinetic Energy Released perunit Mass</i>
LET	: <i>Linear Energy Transfer</i>
LP	: <i>Lapacian Piramida</i>
mA	: <i>Milliampere</i>
MCNP	: <i>Monte Carlo N-Particle</i>
OAR	: <i>Organs At Risk</i>
ORNL	: <i>Oak Ridge National Laboratory</i>
PET	: <i>Positron Emission Tomography</i>
PHITS	: <i>Particle and Heavy Ion Transport code System</i>
PTV	: <i>Planning Target Volume</i>
RBE	: <i>Relative Biological Effectiveness</i>
RF	: <i>Radio Frequency</i>
SINAR UV	: <i>Sinar Ultra Violet</i>
TPS	: <i>Treatment Planning System</i>
WHO	: <i>World Health Organization</i>

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

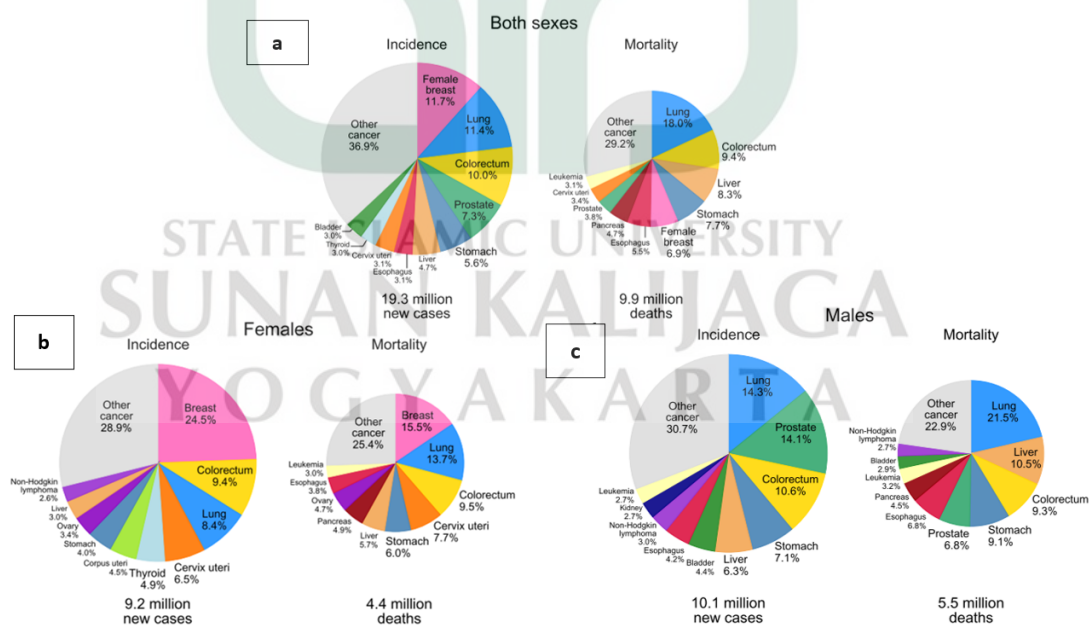
Kanker merupakan kondisi medis yang mengakibatkan tingkat kematian tertinggi pada tahun 2020 karena pertumbuhan sel yang tidak terkendali (WHO, 2022). Kanker lambung merujuk pada perkembangan sel yang tidak normal dan tidak terkontrol di dalam perut yang ditunjukkan pada **Gambar 1.1**. Perubahan struktur sel DNA dapat diperparah oleh eksposur berulang terhadap sinar UV, sinar-X, dan bahan kimia yang bersifat radioaktif (Wulandari dkk., 2018). Berbagai penyebab kanker lambung dapat berasal dari faktor eksternal, seperti kebiasaan merokok, gaya hidup yang tidak sehat, infeksi bakteri atau virus, serta paparan terhadap radiasi pengion (Yusefi dkk., 2018).



**Gambar 1.1** Citra kanker menggunakan a) *esofagogastroduodenoskopi* b) PET-CT scan (Chun dkk., 2018)

Penyakit kanker di Amerika menduduki penyebab kematian nomor dua dengan perkiraan mencapai 2.000.140 kasus kanker dan 611.720 kasus kematian di tahun 2024 (Siegel dkk., 2024). Pada tahun 2020, terdapat 396.914 kasus kanker yang tercatat di Indonesia, dengan jumlah kematian mencapai 234.511 (GLOBOCAN, 2020).

*American Cancer Society* (2023) melaporkan sekitar 26.500 kasus baru kanker lambung di Amerika. Sekitar 11.130 kematian dikaitkan dengan jenis kanker ini, dengan 6.690 kasus pada pria dan 4.440 kasus pada wanita (Siegel dkk., 2023). Selain itu, kanker lambung sering terjadi di negara-negara dengan tingkat ekonomi menengah ke atas dan masuk dalam sepuluh penyebab utama kematian (WHO, 2020). Menurut data *Global Cancer Statistik* tahun 2022, tercatat 19,3 juta kasus kanker dengan 7,1% kasus kanker lambung pada laki-laki dan 4% pada perempuan. Total kematian mencapai 9,9 juta, dengan 9,1% pada laki-laki dan 6,0% pada perempuan (Sung dkk., 2021; Thuler, 2022). Pada tahun 2020, kasus kanker lambung di Indonesia menduduki urutan ke-19 dengan kematian di peringkat ke-16. Pada tahun 2022, kasus meningkat ke urutan ke-18 dan kematian ke urutan ke-14 (Sung dkk., 2021; Ferlay dkk., 2023).



**Gambar 1.2** Kasus kanker diseluruh dunia menurut *Global Cancer Observatory* a) semua jenis kelamin b) perempuan c) laki-laki (Sung dkk., 2021)

Melihat banyaknya penderita kanker dan risiko kematian yang tinggi, semua orang memiliki tanggung jawab untuk memberikan bantuan dan mencari solusi atas masalah tersebut. Dalam ajaran Nabi, terdapat banyak petunjuk untuk mencari pengobatan dan penyebutan mengenai manfaat obat-obatan. Menurut riwayat dari Jabir bin Abdillah RA, Nabi Muhammad SAW menyatakan bahwa:

"اللَّهُ بِإِذْنِ بَرَاءِ الدَّاءِ دَوَاءٌ أُصِيبَ فَإِذَا، دَوَاءٌ دَاءٍ لِكُلِّ"

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

Dalam hadis tersebut dijelaskan bahwa segala sesuatu mungkin terjadi jika Allah menghendaki (Hakim dan Ismail, 2020). Saat seseorang diberikan cobaan berupa penyakit, maka harus aktif dalam usaha penyembuhan dan berupaya sebaik mungkin dengan hasil akhirnya tetap merupakan ketentuan Allah.

Penyakit kanker lambung dapat diobati dengan berbagai metode yang telah digunakan di seluruh dunia salah satunya radioterapi (Srivastava dkk., 2014). Aplikasi metode radioterapi terdiri dari *carbon ion therapy*, *proton therapy*, *brachytherapy*, *x-ray therapy*, *gamma knife*, dan *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) (Matsumoto dkk., 2021). Sinar-x, proton, dan karbon ion terapi dilakukan dengan beberapa fraksinasi. Fraksinasi yang berulang dapat menyebabkan dosis yang diterima pada sel sehat lebih banyak dibandingkan dengan sel kanker. BNCT dipilih karena dapat membunuh sel kanker secara tertarget dengan sekali fraksinasi.

BNCT adalah radioterapi yang menggunakan reaksi nuklir  $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$  di dalam tubuh pasien. Teknologi BNCT dipilih karena memberikan potensi yang cukup besar

dengan dasar penggunaan tangkapan neutron. Boron adalah salah satu jenis atom yang memiliki kemampuan penyerapan neutron yang tinggi. Reaksi tersebut berada di jaringan, ketika partikel  $\alpha$  dan  ${}^7\text{Li}$  secara akurat menghancurkan sel kanker karena sifat dari *Linear Energy Transfer* (LET) (Sauerwein dkk., 2021). Sebelum melakukan *treatment* dengan BNCT maka diperlukan TPS (*Treatment Planning System*) yang berguna untuk mengevaluasi kualitas rencana radioterapi yang akan dilakukan terkait kesesuaian klinis dari distribusi dosis yang akan diaplikasikan (Hernandez dkk., 2020).

Distribusi dosis merupakan penyebaran dosis radiasi dalam suatu volume atau area tertentu. Perhitungan distribusi dosis dapat dilakukan dengan menggunakan program *Monte Carlo* (MC) yang saat ini dikembangkan dengan simulasi. Simulasi *Monte Carlo* adalah teknik komputasi yang menerapkan sistem probabilistik yang ditentukan oleh mikroskopis *cross section*. Simulasi yang berbasis *Monte Carlo* yakni MCNP, FLUKA, GEANT4 dan PHITS (Chen dkk., 2019). Masing-masing dari program yang berbasis *Monte Carlo* memiliki kelebihan dan kekurangan. Program PHITS dipilih karena pada tahun 2017 peningkatan pengguna PHITS mencapai 3000 pengguna serta dapat mensimulasi berbagai partikel seperti neutron, proton, elektron, dan sebagainya. Program PHITS menyediakan data *library* mikroskopis *cross section* yang terdistribusi dari energi 0,0001 eV hingga 1 TeV, dengan data *library* itu maka PHITS dapat menghitung reaksi yang banyak (JAEA, 2024; Sato, 2023). Program PHITS dapat diunduh pada web JAEA secara gratis (Sato dkk., 2018).

Beberapa penelitian telah dilaksanakan terkait terapi BNCT. Bilalodin dkk (2023) melakukan penelitian menganalisis dosis dari terapi BNCT untuk penyakit *head cancer*

menggunakan kode PHITS. Penelitian yang dilakukan Bilalodin (2023) mendapatkan hasil dosis yang optimum sebesar 80  $\mu\text{g/g}$  dengan waktu iradiasi tersingkat 13 menit 08 detik. Penelitian serupa dilakukan oleh Fitriani dkk (2018) yaitu menganalisis dosis kanker paru-paru pada terapi dengan menggunakan PHITS. Hasil dari penelitian Fitriani diperoleh hasil dosis Boron yang optimal adalah 150  $\mu\text{g/g}$  dengan waktu iradiasi 36 menit 23 detik arah *Anterior Posterior* (AP). Waktu tersingkat dengan dosis Boron yang optimal maka akan meningkatkan penghancuran sel kanker sekaligus meminimalkan kerusakan pada jaringan sehat.

Optimasi waktu sebagai fungsi arah penyinaran partikel neutron untuk konsentrasi boron yang sama. Arah penyinaran partikel neutron akan berpengaruh pada distribusi dosis kanker yang dihasilkan (Ntoy dan Sardjono, 2017). Namun perlu diketahui konsep dari proteksi radiasi yaitu justifikasi, limitasi, dan optimasi (Rahman, 2020). Arah penyinaran partikel neutron harus tetap diperhatikan agar dosis yang terserap pada organ sehat tidak melebihi batas ambang.

Berdasarkan studi Bilalodin (2023) dan Fitriani (2018), belum ada penelitian yang memfokuskan distribusi dosis dan Arah penyinaran partikel neutron dengan waktu tersingkat pada terapi kanker lambung melalui BNCT. Pada penelitian ini akan melakukan analisis tentang penentuan distribusi dosis pada kanker lambung dengan modalitas terapi *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) menggunakan *software* PHITS versi 3.341.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Berapa distribusi dosis pada kanker dan organ berisiko di sekitarnya menggunakan metode BNCT dengan *software* PHITS versi 3.341?
2. Berapa waktu yang optimum untuk membunuh kanker menggunakan metode BNCT berbasis *software* PHITS versi 3.341 dengan arah penyinaran partikel neutron yang berbeda?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan memiliki tujuan yaitu:

1. Menentukan distribusi dosis pada kanker dan organ berisiko di sekitarnya menggunakan metode BNCT dengan *software* PHITS versi 3.341?
2. Menentukan waktu yang optimum untuk membunuh sel kanker menggunakan metode BNCT berbasis *software* PHITS versi 3.341 dengan arah penyinaran partikel neutron yang berbeda?

## 1.4 Batasan Penelitian

Pada penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Jenis kanker yang disimulasikan dalam penelitian ini adalah kanker lambung stadium IB.
2. Karakteristik dari *phantom* adalah *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) dengan komposisi *phantom* mengacu pada *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) publikasi 145.



3. Penentuan terbatas pada terapi radiasi BNCT dengan sumber neutron yang dihasilkan dari siklotron 30 MeV dengan arus 1 mA.
4. Variasi konsentrasi senyawa Boron yang digunakan sebesar 20, 40, 60, 80, dan 100  $\mu\text{g/g}$  jaringan.
5. Variasi arah yang digunakan sudut  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ .
6. Visualisasi terkait distribusi dosis total pada kanker lambung tidak dibuat, hanya menampilkan nilai dari dosis yang didapatkan

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini memiliki manfaat untuk menambah wawasan dan khsanah keilmuan terkait modalitas BNCT untuk terapi kanker. Informasi yang diperoleh dari penelitian ini dapat berupa rencana radioterapi pada BNCT serta dapat menentukan dosis yang sesuai untuk kanker lambung pada terapi BNCT. Manfaat lainnya dapat mengembangkan *software* PHITS dalam terapi BNCT.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dilakukan dan analisis hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa:

1. Laju dosis yang terdistribusi untuk GTV sebesar  $3,12 \cdot 10^{-2}$  Gy/s pada arah penyinaran neutron dengan sudut  $0^\circ$ . Penelitian ini juga memastikan bahwa dosis ekuivalen yang diterima oleh semua OAR sudah sesuai dengan standar keselamatan dosis yang diizinkan. Dosis yang diterima oleh masing-masing OAR adalah sebagai berikut: kulit menerima dosis sebesar  $150 \cdot 10^{-2}$  Gy.Eq, lambung  $674 \cdot 10^{-2}$  Gy.Eq, tulang rusuk  $255 \cdot 10^{-2}$  Gy.Eq, hati  $117 \cdot 10^{-2}$  Gy.Eq, sumsum tulang belakang  $34 \cdot 10^{-2}$  Gy.Eq, usus halus  $111 \cdot 10^{-2}$  Gy.Eq, dan ginjal menerima dosis sebesar  $220 \cdot 10^{-2}$  Gy.Eq.
2. Kesimpulan dari penelitian ini, hasil yang paling optimal diperoleh pada sudut penyinaran  $0^\circ$  dengan konsentrasi Boron tertinggi, yaitu  $100 \mu\text{g/g}$  jaringan kanker. Waktu iradiasi tersingkat yang diperoleh adalah 26,97 menit.

#### 5.2 Saran

Terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan oleh penelitian selanjutnya yaitu:

1. Penelitian ini dilakukan dengan histori 300 juta partikel dengan rata-rata error sebesar 10%, namun presentase 10% dapat ditoleransi karena mendekati realitasnya. Diharapkan penelitian selanjutnya mensimulasikan dengan histori

lebih banyak agar *error* semakin kecil yaitu  $<0,05$  atau 5%, sehingga hasil yang didapat semakin akurat.

2. Variasi konsentrasi Boron yang digunakan dalam penelitian ini hanya sampai 100  $\mu\text{g/g}$  diharapkan untuk melakukan sampai 150  $\mu\text{g/g}$  di penelitian yang akan datang.
3. Variasi yang digunakan dapat berupa energi dan intensitas arus dari siklotron yang berbeda.
4. Menggunakan *phantom* yang menyerupai dengan tubuh manusia seperti *phantom voxel* ataupun *phantom mesh*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alaei, P., 2008. *Introduction to Health Physics: Fourth Edition. Medical Physics. Vol. 35.*
- Aliwikarta, K., Nurheni S. P., Puspo E. G., 2016. “Prevalensi Penyakit Kanker Di Indonesia Berdasarkan Pola Konsumsi Pangan Dan Gaya Hidup Cancer Prevalence in Indonesia Based on Food Consumption Patterns and Lifestyle Newly Weds Foods Asia Pacific 2.” *Jurnal Mutu Pangan Vol. 3 (1):* 71–78.
- Alqahtani, F. F., 2023. “SPECT/CT and PET/CT, Related Radiopharmaceuticals, and Areas of Application and Comparison.” *Saudi Pharmaceutical Journal Vol. 31 (2):* 312–28.
- Ardana, I. M., Adi D. N.,, Yohannes S., 2019. “Kajian Teknologi Boron Neutron Capture Therapy (Bnct) Dan Aspek Regulasinya,” 95–101.
- Ardana, I M., dan Yohannes S., 2017. “Optimization of a Neutron Beam Shaping Assembly Design for Bnct and Its Dosimetry Simulation Based on Mcnpx.” *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega Vol. 19 (3):* 121.
- Bae, Y. S., Dong S. K., Hyo J. S., Je U. H., Hyung J. Y., Jung J. H., Ju J. K., 2022. “Advances of LINAC-Based Boron Neutron Capture Therapy in Korea.” *AAPPS Bulletin Vol. 32 (1).*
- Barth, Rolf F., Graca H. V., Otto K. H., Kiger I., Kent J. R., Peter J. B., dan Franz M. W., 2012. “Current Status of Boron Neutron Capture Therapy of High Grade Gliomas and Recurrent Head and Neck Cancer,” 1–21.
- Bilalodin, Aris Haryadi, and Farzand Abdullatif. 2023. “Dose Analysis of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) on Head Cancer Using PHITS Code with Neutron Source from Accelerator.” *Journal of Physics: Conference Series 2498 (1).*
- Bisello, Silvia, Savino Cilla, Anna Benini, Raffaele Cardano, Nam P Nguyen, Francesco Deodato, Gabriella Macchia, et al. 2022. “Dose – Volume Constraints fOr ORganS At Risk In Radiotherapy ( CORSAIR ): An ‘ All-in-One ’ Multicenter – Multidisciplinary Practical Summary” C: 7021–50.
- Burnet, N. G., Simon J. T., Kate E. B., dan Sarah J. J., 2004. “Defining the Tumour and Target Volumes for Radiotherapy.” *Cancer Imaging Vol. 4 (2):* 153–61.
- Chen, Zhao, Peng Yang, Qin Lei, Yumei Wen, Donglin He, Zhangwen Wu, and Chengjun Gou. 2019. “Comparison of BNCT Dosimetry Calculations Using

- Different Geant4 Physics Lists.” *Radiation Protection Dosimetry* **Vol. 187 (1)**: 88–97.
- Chun, Seok-Joo., Seung H. J., dan Eui K. C., 2018. “A Case Report of Salvage Radiotherapy for a Patient with Recurrent Gastric Cancer and Multiple Comorbidities Using Real-Time MRI-Guided Adaptive Treatment System.” *Cureus* **Vol. 10 (4)**.
- Dymova, Mayya A., Sergey Y. T., Vladimir A. R., dan Elena V. K., 2020. “Boron Neutron Capture Therapy: Current Status and Future Perspectives.” *Cancer Communications* **Vol. 40 (9)**: 406–21.
- Edyvean, S., dan Gelijns., 2013. *Chapter 11: Computed Tomography. Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences.* **Vol. 44**.
- Fajariyah, Nur, Diah A., dan Arentika L. C., 2023. “Hubungan Pengetahuan Dan Pola Makan Dengan Kejadian Gastritis Pada Remaja Di SMA Negeri 93 Jakarta Timur” 9.
- Fitriani, Liani Dwi, Bambang Murdaka Eka Jati, Yohannes Sardjono, Gede Sutresna Wijaya, Isman Mulyadi Triatmoko, and Zuhdi Ismail. 2018. “Dose Analysis on Lung Cancer Therapy by Boron Neutron Capture Therapy Method Using PHITS 3.26.” *International Journal of Advanced Scientific Research & Development. (IJASRD)* **Vol 29 (7)**: 35–45.
- Fukuda, Hiroshi. 2021. “Response of Normal Tissues to Boron Neutron Capture Therapy (Bnct) With  $^{10}\text{B}$ -Borocaptate Sodium (BSH) and  $^{10}\text{B}$ -Paraboronophenylalanine (Bpa).” *Cells* **Vol. 10 (11)**.
- Furuta, Takuya, dan Tatsuhiko S., 2021. “Medical Application of Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS.” *Radiological Physics and Technology.* Springer.
- Ferlay, Jacques, Murielle Colombet, Isabelle Soerjomataram, Donald M. Parkin, Marion Piñeros, Ariana Znaor, and Freddie Bray. 2023. “Cancer Statistics for the Year 2022: An Overview.” *International Journal of Cancer* 149 (4):
- GLOBOCAN. 2020. “Indonesia.” *Jurnal*
- Hakim, M., dan Ismail., 2020. *THIBBUN NABAWI: Tinjauan Syariat Dan Medis.* JAKARTA: Gema Insani.
- Hernandez, Victor, Christian R., Lamberto W., Anna B., Richard C., Marco F., Julia G., 2020. “What Is Plan Quality in Radiotherapy? The Importance of

Evaluating Dose Metrics , Complexity , and Robustness of Treatment Plans.” *Radiotherapy and Oncology* **Vol. 153**: 26–33.

Howell, John R., and Kyle J. Daun. 2021. “The Past and Future of the Monte Carlo Method in Thermal Radiation Transfer.”

Huang, Sheng Fang, Jang Chun Lin, An Cheng Shiau, Yun Chih Chen, Ming Hsien Li, Jo Ting Tsai, and Wei Hsiu Liu. 2020. “Optimal Tumor Coverage with Different Beam Energies by IMRT, VMAT and TOMO: Effects on Patients with Proximal Gastric Cancer.” *Medicine (United States)* **Vol. 99 (47)**: E23328.

IAEA. 2001. “Current Status of Neutron Capture Therapy.” *Iaea-Tecdoc-1223*.

IAEA. 2008. “Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice.” *Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice*, **No. 465**: 230.

IAEA. 2023. “Advances in Boron Neutron Capture Therapy..”

ICRP. 2007. “3 . Dosimetric Quantities Used In Radiological Protection” **Vol. 103 (24)**: 29–31.

Ilic, Milena, dan Irena I., 2022. “Epidemiology of Stomach Cancer.” *World Journal of Gastroenterology*. Baishideng Publishing Group Inc.

Im, Ki Chun, Ik Soo Choi, Jin Sook Ryu, Gi Seoung Eo, Jae Seung Kim, and Dae Hyuk Moon. 2010. “PET/CT Fusion Viewing *Software* for Use with Picture Archiving and Communication Systems.” *Journal of Digital Imaging* **Vol. 23 (6)**: 732–43

JAEA., 2024 “PHITS” Diakses pada tanggal 18 Maret 2024.

Jalut, Laura L. S., Ni N. R., dan Yohanes S., 2020. “Analysis of Boron Dose on BNCT Technique with Simulation Methods Using the PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System).” *Buletin Fisika* **Vol. 21 (1)**: 1–7.

Jin, Will H., Crystal Seldon, Michael B., Wolfgang S., dan Huan B. Giap. 2022. “A Review of Boron Neutron Capture Therapy: Its History and Current Challenges.” *International Journal of Particle Therapy* **Vol. 9 (1)**: 71–82.

Kakino, Ryo, Naonori Hu, Kayako Isohashi, Teruhito Aihara, Keiji Nihei, and Koji Ono. 2022. “Comprehensive Evaluation of Dosimetric Impact against Position Errors in Accelerator-Based BNCT under Different Treatment Parameter Settings.” *Medical Physics* **Vol. 49 (8)**: 4944–54.

- Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2010. "Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2010 Tentang Pemantauan Kesehatan Untuk Pekerja Radiasi." *BAPETEN*.
- Kesuma, Dytchia S., 2020. "Penentuan Margin Pada Kanker Prostat Dengan Memperhitungkan Pergerakan Organ." *Ensiklopedia of Journal Vol. 2 (2)*: 165–69.
- Kharisov, Boris I., 2013. "Main Ionizing Radiation Types and Their Interaction with Matter." *Radiation Synthesis of Materials and Compounds*, 20–47.
- Kim, Sung G., Ho S. S., Han H. L., Kyo Y. S., dan Cho H., P., 2017. "Comparison of the Differences in Survival Rates between the 7th and 8th Editions of the Ajcc Tnm Staging System for Gastric Adenocarcinoma: A Single-Institution Study of 5,507 Patients in Korea." *Journal of Gastric Cancer Vol. 17 (3)*: 212–19.
- Kim, Moo Sub, Han Back Shin, Min Geon Choi, Hajime Monzen, Jae Goo Shim, Tae Suk Suh, dan Do Kun Yoon. 2020. "Reference Based Simulation Study of Detector Comparison for BNCT-SPECT Imaging." *Nuclear Engineering and Technology* 52 (1): 155–63.
- Kumada, Hiroaki, Takeji S., dan Hideyuki S., 2023. "Current Development Status of Accelerator-Based Neutron Source for Boron Neutron Capture Therapy." *EPJ Techn Instrum* 5.
- Kumada, Hiroaki, dan Kenta T., 2018. "Treatment Planning System and Patient Positioning for Boron Neutron Capture Therapy." *Therapeutic Radiology and Oncology* 2: 50–50.
- Kuriyama, Y., M. Hino, Y. Iwashita, R. Nakamura, dan H. Tanaka., 2023. "Study on Construction of an Additional Beamline for a Compact Neutron Source Using a 30 MeV Proton Cyclotron." *Journal of Physics: Conference Series Vol. 24 20 (1)*.
- Kong, Feng M., Timothy R., Douglas J. Quint, Suresh S., Laurie E., Gaspar, Ritsuko U., Komaki, Coen W., Hurkmans., 2011. "Consideration of Dose Limits for Organs at Risk of Thoracic Radiotherapy: Atlas for Lung, Proximal Bronchial Tree, Esophagus, Spinal Cord, Ribs, and Brachial Plexus." *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* **Vol. 81 (5)**: 1442–57.
- Lamba, Manisha G., Avijit B., dan Anupam., 2021. "A periodic development of BPA and BSH based derivatives in boron neutron capture therapy (BNCT)." *Journal Chemical Communications* **Vol. 57 (7)**: 827-839

- Lauren, Pecorino., 2021. *Molecular Biology of Cancer: Mechanisms, Targets, and Therapeutics*. Oxford University Press.
- Li, Guangru., Wei J., Lu Z., Weiqiang C., dan Qiang L., 2021. “Design of Beam Shaping Assemblies for Accelerator-Based BNCT With Multi-Terminals.” *Frontiers in Public Health* 9 (March): 1–10.
- Liu, Yu, Chao Zhang, Chang Li, Juan Cheng, Yadong Zhang, Huiqin Xu, Tao Song, Liang Zhao, and Xun Chen. 2020. “A Practical PET/CT Data Visualization Method with Dual-Threshold PET Colorization and Image Fusion.” *Computers in Biology and Medicine* Vol. 126 (07): 104050.
- Lodge, M.A, dan E. C Frey., 2014. “Chapter 11: Nuclear Medicine Imaging Devices.” *Nuclear Medicine Physics :A Handbook for Teachers and Students*, 1–185.
- Lomax, M. E. L. K., Folkes., dan P. O’Neill. 2013. “Biological Consequences of Radiation-Induced DNA Damage: Relevance to Radiotherapy.” *Clinical Oncology* Vol. 25 (10): 578–85.
- Lonsdale, Markus N., dan Thomas B., 2010. “Dual-Modality PET/CT Instrumentation- Today and Tomorrow.” *European Journal of Radiology* Vol. 73 (3): 452–60.
- Lubis, Romia. 2020. “Metode Simulasi Montecarlo.”
- Majumder, Dipanjan., Niladri P., Debashis C., Swapan M., Apurba K., dan Anjali M. 2014. “Prescribed Dose versus Calculated Dose of Spinal Cord in Standard Head and Neck Irradiation Assessed by 3-D Plan.” *South Asian Journal of Cancer* Vol. 3 (1): 22–27.
- Martin, Colin J., John D H., dan Madan M R., 2020. “Physica Medica Effective Dose from Radiation Exposure in Medicine : Past , Present , and Future.” *Physica Medica* Vol. 79 (October): 87–92..
- Matsumoto, Yoshitaka, Nobuyoshi F., Hitoshi I., Kei N., dan Hideyuki S., 2021. “A Critical Review of Radiation Therapy: From Particle Beam Therapy (Proton, Carbon, and Bnct) to Beyond.” *Journal of Personalized Medicine* Vol. 11 (8).
- Mayssara A. Abo H., Affiifi. 2018. “Pengaruh Gastritis Terhadap Kehidupan Sehari Hari.” *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 7–29.
- Monti Hughes, Andrea, and Naonori Hu. 2023. “Optimizing Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) to Treat Cancer: An Updated Review on the Latest Developments on Boron Compounds and Strategies.” *Cancers* 15 (16): 1–30.



- Nedunchezian, Kavita, Nalini A., Manigandan T., dan Sarumathi T., 2016. "Boron Neutron Capture Therapy - a Literature Review." *Journal of Clinical and Diagnostic Research* **Vol. 10 (12)**: ZE01–4.
- Ntoy, Suhendra Gunawan, and Yohannes Sardjono. 2017. "Calculation of Bnct Dosimetry for Brain Cancer Based on Kartini Research Reactor Using Phits Code." *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega* **Vol. 19 (3)**: 159.
- Pak, Sungmin, dan Francis A. Cucinotta. 2021. "Comparison between PHITS and GEANT4 Simulations of the Heavy Ion Beams at the BEVALAC at LBNL and the Booster Accelerator at BNL." *Life Sciences in Space Research* **Vol. 29** (May): 38–45.
- Pandit, V. S., 2019. "Cyclotrons: Past, Present and Future." *Indian Journal of Pure and Applied Physics* **Vol. 57 (8)**: 519–26.
- Patel, dan De J. O., 2023. "CT Scan." 2023.
- Paulsen, Friedrich, and Jens Waschke. 2018. "Organ Dalam (Viscera) Abdomen." *Sobotta Atlas of Human Anatomy* **(1)**: 69–156.
- Podgorsak, Ervin B., 2014. *Compendium to Radiation Physics for Medical Physicists. Compendium to Radiation Physics for Medical Physicists.*
- Pratiwi, Asa. 2022. "Analisis Dosis Pada Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Untuk Penanganan Metastasis Kanker Ovarium Menggunakan PHITS 3.26." *Skripsi UGM.*
- Primadila, Ervy, D. M., Heru P., dan Muhammad A. J. K., 2020. "Estimasi Dosis Radiasi 3D Energi Foton Berbasis Percentage Depth Dose (PDD) Dan Profile Dose Untuk Treatment Planning System (TPS) Pesawat LINAC." *Jurnal Fisika Unand* **Vol. 9 (3)**: 323–30.
- Purohit, Mahima, dan Manoj K., 2022. "Boron Neutron Capture Therapy: History and Recent Advances." *Materials Today: Proceedings.*
- Putri, Tiara Septiana, Fajar Arianto, and Joko Sampurno. 2023. "Simulasi Monte Carlo Untuk Menentukan Dosis Radiasi Linac Pada Jaringan Lunak Dengan Penyisipan Organ" **Vol. 11 (1)**: 1–5.
- Puspita, Maria .D.R., 2021 " Analisis Dosis Terapi Kanker Serviks dengan Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Berbasis Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS)" *Skripsi UGM*

- Putri, Tiara S., Fajar A., dan Joko S., 2023. “Simulasi Monte Carlo Untuk Menentukan Dosis Radiasi Linac Pada Jaringan Lunak Dengan Penyisipan Organ” **Vol. 11 (1):** 1–5.
- Rahman, Fadhil U. A., Aga S., Nurrachman E., Renwi A., Lusi E., dan Azhari A., 2020. “Paradigma Baru Konsep Proteksi Radiasi Dalam Pemeriksaan Radiologi Kedokteran Gigi: Dari ALARA Menjadi ALADAIP.” *Jurnal Radiologi Dentomaksilofasial Indonesia (JRDI)* **Vol. 4 (2):** 27.
- Rahmawati H, Budi H., 2021. “Radiologist.” *Muhammadiyah Public Health Journal* **Vol.1 (1):** 79–103.
- Ramadhani, Amanda Dhyan Purna, Susilo Susilo, Irfan Nurfatthan, Yohannes Sardjono, Widarto Widarto, Gede Sutresna Wijaya, and Isman Mulyadi Triatmoko. 2020. “Dose Estimation of the Bnct Water Phantom Based on Mcnpx Computer Code Simulation.” *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega* **Vol. 22 (1):** 23. <https://doi.org/10.17146/tdm.2020.22.1.5780>.
- Rodriguez, C., M. Carpano, P. Curotto, S. Thorp, M. Casal, G. Juvenal, M. Pisarev, dan M. A. Dagrosa. 2018. “In Vitro Studies of DNA Damage and Repair Mechanisms Induced by BNCT in a Poorly Differentiated Thyroid Carcinoma Cell Line.” *Radiation and Environmental Biophysics* **Vol. 57 (2):** 143–52.
- Roohani, Siyer, Lisette M. Wiltink, David Kaul, Mateusz Jacek Spalek, and Rick L. Haas. 2024. “Update on Dosing and Fractionation for Neoadjuvant Radiotherapy for Localized Soft Tissue Sarcoma.” *Current Treatment Options in Oncology* **Vol. 25 (4):** 543–55.
- Sato, Tatsuhiko. 2023. “User’s Manual Ver. 3.30 English Version Preface.”
- Sato, Tatsuhiko, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai., 2018. “Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) Version 3.02.” *Journal of Nuclear Science and Technology* **Vol. 55 (6):** 684–90.
- Sauerwein, Wolfgang A.G. Sauerwein Andrea Nakagawa, Raymond Moss, Yoshinobu. 2012. *Studies on the Possible Application of BNCT to Thyroid Cancer. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications.* **Vol. 9783642313.**
- Sauerwein, Wolfgang A.G., Lucie Sancey, Evamarie Hey-Hawkins, Martin Kellert, Luigi Panza, Daniela Imperio, Marcin Balcerzyk., 2021. “Theranostics in Boron Neutron Capture Therapy.” *Life* **Vol. 11 (4).**

- Seuntjens, J P. 2012. *Chapter 2 Dosimetric Principles, Quantities and Units. Energy.*
- Siegel, Rebecca L., Kimberly D. Miller, Nikita Sandeep Wagle, and Ahmedin Jamal. 2023. "Cancer Statistics, 2023." *CA: A Cancer Journal for Clinicians* **Vol. 73 (1)**: 17–48.
- Siegel, Rebecca L, Angela N Giaquinto, and Ahmedin Jamal. 2024. "Cancer Statistics, 2024." *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, October 2023: 12–49.
- Silarski, M., Dziedzic-Kocurek., Sobczuk., Nykiel., Moskal., Niedźwiecki., Stępien, dan Szczepanek., 2023. "A New Detector Concept Based on the Prompt Gamma Radiation Analysis for In Vivo Boron Monitoring in BNCT." *Radiation Protection Dosimetry* **Vol. 199 (15–16)**: 1932–36.
- Society, American Cancer. 2023. "Key Statistics About Stomach Cancer."
- Srivastava, R., B Jyoti., J Dixit 2014. "Neutron Therapy-A Novel Approach to Radiotherapeutics: A Review." *Researchgate.Net* **Vol. 1 (2)**: 61–70.
- Suharmono, Bambang H., Ika Y. A., Hilmaniyya dan Suryani D. A., 2020. "Quality Assurance (QA) Dan Quality Control (QC) Pada Instrumen Radioterapi Pesawat LINAC." *Jurnal Biosains Pascasarjana* **Vol. 22 (2)**: 73.
- Sukaryono. 2015. "Kajian Jenis Iradiator" 17 (November): 101–5.
- Sung, Hyuna, Jacques F., Rebecca L., Siegel, M. L., Isabelle S., Ahmedin J., dan Freddie B., 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 (3)**: 209–49.
- Suntoro, Achmad. 2012. "Analisis Proses Pengambilan Data Pada Rekonstruksi Koordinat Untuk Treatment Planning System ( TPS ) Brakiterapi" **Vol. 9** (November): 69–78.
- Suzuki, Minoru. 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 (1)**: 43–50.
- Syamputra, Dhani N. I., Yohannes S., dan Rida S. N. M., 2020. "Dose Analysis of BNCT Treatment Method for Rhabdomyosarcoma in the Head and Neck Regions Based on PHITS Code." *ASEAN Journal on Science and Technology for Development* **Vol. 35 (3)**: 235–39.
- Taniguchi, Kiyooki, Masaho O., Takuji Y., Akiko S., Takeharu N., Kunihiko A., Sho

- Kotake., 2019. “Staging of Gastric Cancer with the Clinical Stage Prediction Score.” *World Journal of Surgical Oncology* **Vol. 17** (1): 1–6.
- Thuler, L. C. S., 2022. “The Epidemiology of Stomach Cancer.” *Exon Publications*, 101–10.
- Tortora GJ, Derrickson B., 2017. “Dasar Anatomi Dan Fisiologi Pemeliharaan Dan Kontinuitas Tubuh Manusia.”
- Tsoufanidis, Nicholas. 2015. *Accessing the E-Book Edition*.
- Wang, Song, Zhengchao Zhang, Lele Miao, and Yumin Li. 2022. “Boron Neutron Capture Therapy: Current Status and Challenges.” *Frontiers in Oncology* **Vol. 12** (3): 1–11.
- WHO. 2020. “The Top Causes of Death.” Diakses pada tanggal 13 Desember 2023
- WHO. 2022. “Cancer.” 2022. Diakses pada tanggal 27 Desember 2023.
- Wu, Chun Yi, Hsin Hua Hsieh, Ting Yu Chang, Jia Jia Lin, Chin Ching Wu, Ming Hua Hsu, Ming Chia Lin, and Shin Lei Peng. 2021. “Development of Mri-Detectable Boron-Containing Gold Nanoparticle-Encapsulated Biodegradable Polymeric Matrix for Boron Neutron Capture Therapy (Bnct).” *International Journal of Molecular Sciences* **Vol. 22** (15): 1–13.
- Wulandari, Tawang, Marji, dan Lailil Muflikhah. 2018. “Klasifikasi Jenis Kanker Berdasarkan Struktur Protein Menggunakan Algoritma Naive Bayes.” *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer* **Vol. 2** (10): 3738–43.
- Yusefi, Ali R., Kamran B. L, Peivand B, Maryam R, dan Zahra K., 2018. “Risk Factors for Gastric Cancer: A Systematic Review.” *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention* **Vol. 19** (3): 591–603.
- Zahro, Fatimatuz. 2016. “Pengaruh Sari Buah Pepino (*Solanum Muricatum* Aiton) Terhadap Penyembuhan Ulser Dan Gambaran Histopatologi Lambung Mencit Swiss-Webster Serta Pemanfaatannya Sebagai Leaflet,” 1–81.