

**PERHITUNGAN DOSIMETRI *BORON NEUTRON*  
*CAPTURE THERAPY* (BNCT) PADA KANKER KULIT  
MENGUNAKAN MCNPX**

**Skripsi**

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan  
mencapai derajat Sarjana S-1  
Program studi Fisika**



**diajukan oleh  
ISTIKOMAH**

**11620027**

**Kepada**

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

**2017**

# PERHITUNGAN DOSIMETRI *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY* (BNCT) PADA KANKER KULIT MENGGUNAKAN MCNPX

Istikomah  
11620027

## ABSTRAK

*Melanoma Maligna* (MM) merupakan jenis kanker kulit yang paling berbahaya karena dapat menyerang jaringan didekatnya dan menyebar kebagian tubuh lainnya, kanker ini dapat diterapi dengan *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT). BNCT merupakan terapi radiasi tertarget untuk membunuh kanker dengan memanfaatkan  $^{10}\text{B}$  dan neutron termal. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan geometri kulit yang mengidap kanker MM, mengetahui dosis serap  $^{10}\text{B}$  disekitar kanker dan menentukan energi kolimator waktu iradiasi dengan resiko kerusakan pada jaringan sehat yang paling kecil. Simulasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *software* MCNPX. Dengan mendefinisikan geometri dan komponen penyusun kulit sebagai objek yang diteliti dan sumber radiasi yang digunakan, MCNPX mampu mensimulasikan interaksi neutron yang terjadi di kulit. Keluaran yang didapatkan dari simulasi MCNPX adalah fluks neutron, dosis hamburan neutron, dan dosis foton yang keluar dari kolimator. Fluks neutron keluaran dari MCNPX inilah yang kemudian digunakan untuk menghitung dosis yang berasal dari interaksi neutron dengan material di jaringan. Dari hasil perhitungan diperoleh energi yang optimal untuk terapi kanker kulit dengan menggunakan energi 10 MeV dalam waktu iradiasi 26,6 menit. Dengan dosis serap yang diterima jaringan sehat disekitar kanker (Epidermis, Dermis, PTV, dan CTV) adalah 3,54 Gy, 4,12 Gy, 8,43 Gy, dan 9,46 Gy.

**Kata kunci:** BNCT, kanker kulit, MCNPX, waktu iradiasi

## **CALCULATION OF DOSIMERTY *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT)* IN SKIN CANCER USING MCNPX**

**Istikomah**  
**11620027**

### **ABSTRACT**

Malignant melanoma (MM) is the most dangerous skin cancer because it can attack nearby tissue and spread to other body parts, this cancer can be treated with Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). BNCT is a targeted radiation therapy to kill cancer by utilizing  $^{10}\text{B}$  and thermal neutrons. This study aims to simulate the skin geometry that develops MM cancer, to know the  $^{10}\text{B}$  absorbent dose around the cancer and to determine the irradiated energy of time irradiation with the risk of damage to the smallest healthy tissue. Simulation used in this research is MCNPX software. By defining the geometry and the constituent components of the skin as the object studied and the source of the radiation used, MCNPX is able to simulate the interaction of neutrons occurring in the skin. The outputs obtained from MCNPX simulations are neutron flux, neutron scattering dose, and photon dose coming out of the collimator. Flux neutron output from MCNPX is then used to calculate the dose that comes from the interaction of neutrons with the material in the network. From the calculation results obtained optimal energy for skin cancer therapy by using energy 10 MeV in irradiation time 26.6 minutes. With an acceptable dose of healthy tissue around the cancer (epidermis, dermis, PTV, and CTV) is 3.54 Gy, 4.12 Gy, 8.43 Gy, and 9.46 Gy.

**Keywords:** BNCT, skin cancer, MCNPX, irradiation time

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : Istikomah

NIM : 11620027

Jurusan : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Sunan  
Kalijaga Yogyakarta

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang berjudul : **Perhitungan Dosimetri Boron neutron Capture Therapy (BNCT) pada Kanker Kulit Menggunakan MCNPX** dan seluruh isinya adalah benar-benar karya tulis saya sendiri, kecuali pada bagian tertentu yang telah saya ambil dari karya-karya orang lain dengan memperhatikan etika keilmuan dan penulisan, serta sudah saya cantumkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 8 Mei 2017

Yang menyatakan,



**Istikomah**  
**NIM. 11620027**

## SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal: Persetujuan Skripsi/Tugas Akhir

Lamp.: -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi  
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta  
di Yogyakarta

*Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh*

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk, dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Istikomah

NIM : 11620027

Judul Skripsi : Perhitungan Dosimetri *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) pada Kanker Kulit Menggunakan MCNPX

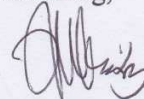
sudah dapat diajukan kembali kepada Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Kimia.

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

*Wassalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh*

Yogyakarta, 8 Mei 2017

Pembimbing,



Asih Melati, M.Sc.

NIP. 19841110 201101 2 017



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga

FM-UINSK-BM-05-07/R0

**PENGESAHAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR**

Nomor : B- 1875/Un.02/DST/PP.05.3/06/2017

Skripsi/Tugas Akhir dengan judul : Perhitungan Dosimetri Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) pada Kanker Kulit Menggunakan MCNPX

Yang dipersiapkan dan disusun oleh :

Nama : Istikomah

NIM : 11620027

Telah dimunaqasyahkan pada : 30 Mei 2017

Nilai Munaqasyah : A-

Dan dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga

**TIM MUNAQASYAH :**

Ketua Sidang

Asih Melati, S.Si, M.Sc.  
NIP. 19691212 200003 1 001

Penguji I

Cecilia Yanuarief, S.Si., M.Si  
NIP.19840127 201503 1 001

Penguji II

Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, M.Si  
NIP. 19771025 200501 1 004

Yogyakarta, 09 Juni 2017

UIN Sunan Kalijaga

Fakultas Sains dan Teknologi  
Desan



Dr. Muntono, M.Si  
NIP. 19691212 200003 1 001

## MOTTO

Ilmu itu lebih baik dari pada harta  
Ilmu engkau dan engkau menjaga harta  
Ilmu itu penghukum (hakim) dan harta itu terhukum  
Harta akan berkurang jika dibelanjakan,  
namun  
Ilmu akan bertambah bila dibelanjakan

**(Ali bin Abi Thalib)**

“Pelajarilah ilmu.

Sebab, dengan ilmu akan menimbulkan rasa takut kepada Allah.

Mempelajari ilmu pengetahuan termasuk ibadah.

Menelaahnya dianggap membaca tasbih,

membahasnya setara dengan takbir,

mengajarkannya kepada orang bodoh dihitung sedekah,

dan mendiskusikan kepada para pakar

dianggap sebagai suatu bentuk kedekatan kepada Allah”.

**(Muadz bin Jabal)**

## HALAMAN PERSEMBAHAN

*Skripsi ini kupersembahkan untuk*

*Ayahanda dan Ibunda tercinta yang tak pernah lelah mendo'akan,*

*mengikhtiarakan apa yang ia bisa untuk putrinya.*

*Salam takdzim dari ananda, semoga Allah membalas kebaikan di dunia dan*

*akhirat. Aamiin*

*Kakak sang motivator sejati: mas Biko dan mbak Siti dan ponakan tercinta yang*

*memberi semangat selama ini.*

*Sosok laki-laki yang telah merelakan menggantikan posisi Ayahanda*

*Almamater tercinta Fisika UIN Sunan Kalijaga*

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA



## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas rahmat Allah Yang Maha Kuasa, hanya atas berkat rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini sebagai salah satu persyaratan mencapai derajat Sarjana Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta. Tak lupa shalawat dan salam untuk junjungan kita, kekasih tercinta Nabi Muhammad saw. Dialah manusia sempurna yang jasanya begitu besar bagi umat Islam. Cinta kasih, pengorbanan, dan perjuangannya yang memberi semangat kepada penulis untuk tidak menyerah dalam berjuang.

Penulisan skripsi dengan judul “Perhitungan Dosimetri *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) pada Kanker Kulit Menggunakan MCNPX” ini menggambarkan dosis boron pada terapi kanker kulit dengan BNCT. Penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari do’a serta pihak-pihak yang telah membantu penulis. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih banyak kepada:

1. Kedua orang tuaku, Ratijo dan Legiyem tercinta yang tak pernah lupa menyelipkan namaku dalam setiap do’anya, kakakku tercinta (mas Biko dan mbak Siti) yang selalu menyemangati dan memberi dukungan kepada penulis.
2. Suami tercinta yang telah menemani dan memotivasi penulis dalam penyelesaian skripsi ini meski dalam kondisi lelah dan penat karena kerjaan di kanktor.
3. Dr. Murtono, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

4. Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si., selaku ketua Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
5. Ibu Asih Melati, S.Si, M.Si., selaku dosen pendamping akademik dan dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing, memberi arahan, dan dan memberi motivasi tatkala penulis sedang down hingga terselesaikannya skripsi ini.
6. Semua staf Tata Usaha dilingkungan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu terselesaikannya skripsi ini.
7. Ibu Ade Ratnasari, S.Kom, M.T., dan segenap dosen Supervisor PPK, terimakasih atas do'anya dan pembelajaran bertanggung jawab dalam sebuah organisasi. Teman-teman PH dan MP PPK 2013-2015, terimakasih untuk kebersamaanya dalam beramal sholeh dan mengemban amanah semoga kelak kita berjumpa lagi.
8. Ustadzh/ustadzah BTHQ ESLUHA, terimakasih atas do'a, dukungan dan ilmu tahsinya, semoga dapat mengamalkannya secara Istiqomah.
9. Para Murobiyah dan teman-teman lingkaran cinta, terimakasih telah menemani dalam berproses dan menimba ilmu, teman-teman "Hikaru" terimakasih telah menjadi keluarga kedua selama di Yogyakarta, semoga kelak kita berjumpa lagi.
10. Teman-teman Fisika, khususnya Fisika 2011 terimakasih atas persahabatan dan motivasinya, sarannya, dan bantuanya, maaf bila belum bisa menjadi sahabat yang baik selama berada disisi kalian.
11. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu atas bantuannya dalam penyelesain skripsi ini.

Demi kesempurnaan skripsi ini, kritik dan saran sangat penulis harapkan. Penulis berharap skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan secara umum dan fisika secara khusus.

Yogyakarta, 27 2017

**Istikomah**

**NIM. 11620027**



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
ABSTRAK .....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
ABSTRAC .....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI.....	
vi	
HALAMAN PENGESAHAN.....	viii
MOTO .....	ix
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	viii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	7
1.3. Tujuan Penelitian .....	8
1.4. Batasan Penelitian.....	8

1.5. Manfaat Penelitian .....	8
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>9</b>
2.1. Studi Pustaka.....	9
2.2. Landasan Teori.....	12
2.2.1. <i>Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)</i> .....	12
2.2.2. Senyawa Boron.....	15
2.2.3. Dosis pada BNCT.....	17
2.2.4. Berkas Neutron.....	20
2.2.5. <i>Melanoma Maligna (MM)</i> .....	22
2.2.6. <i>Monte Carlo N-Particle (MCNP)</i> .....	25
2.2.7. <i>Monte Carlo N-Particle Version X (MCNPX)</i> .....	26
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>29</b>
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	29
3.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.3. Prosedur Kerja.....	29
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>45</b>
4.1. Hasil .....	45
4.2. Pembahasan.....	52
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>60</b>
5. 1. Kesimpulan .....	60

5. 2. Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA .....	61
LAMPIRAN I .....	64
LAMPIRAN II .....	69
LAMPIRAN III.....	70
LAMPIRAN IV.....	72
CURRICULUM VITAE .....	75



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Faktor bobot radiasi.....	20
Tabel 2.2	Parameter kualitas berkas neutron.....	21
Tabel 3.1	Unsur utama penyusun kanker.....	36
Tabel 3.2	Unsur utama penyusun sel sehat.....	36
Tabel 3.3	Jenis <i>tally</i> pada MCNPX .....	37
Tabel 3.4	Faktor bobot.....	43
Tabel 4.1	Fluks neutron pada energi 10 MeV .....	47
Tabel 4.2	Fluks neutron pada energi 15 MeV .....	47
Tabel 4.3	Fluks neutron pada energi 20 MeV .....	48
Tabel 4.4	Fluks neutron pada energi 25 MeV .....	48
Tabel 4.5	Fluks neutron pada energi 30 MeV .....	48
Tabel 4.6	Fluks neutron pada energi 35 MeV .....	49
Tabel 4.7	Laju dosis BNCT pada energi 10 MeV .....	49
Tabel 4.8	Laju dosis BNCT pada energi 15 MeV .....	49
Tabel 4.9	Laju dosis BNCT pada energi 20 MeV .....	50
Tabel 4.10	Laju dosis BNCT pada energi 25 MeV .....	50
Tabel 4.11	Laju dosis BNCT pada energi 30 MeV .....	50
Tabel 4.12	Laju dosis BNCT pada energi 35 MeV .....	51
Tabel 4.13	Laju dosis serap total BNCT pada tiap-tiap jaringan .....	51

Tabel 4.14	Waktu iradiasi pada jaringan kanker .....	52
Tabel 4.15	Dosis serap total pada jaringan sehat.....	52
Tabel 4.16	Efek deterministik pada kulit.....	58





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Data penderita kanker .....	2
Gambar 1.2	Penderita kanker kulit.....	4
Gambar 2.1	Skema interaksi $^{10}\text{B}$ dengan neutron .....	13
Gambar 2.2	Prinsip BNCT .....	14
Gambar 2.3	Struktur molekul BPA dan BSH .....	16
Gambar 2.4	Kurva distribusi fluks neutron termal dan neutron epidermal...	21
Gambar 2.5	Jenis-jenis Melanoma .....	22
Gambar 2.6	Tahapan-tahapan melanoma.....	25
Gambar 2.7	<i>Tampilan Vised pada MCNPX</i> .....	27
Gambar 2.8	Pengkodean <i>file input</i> dengan notepad.....	28
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian .....	30
Gambar 3.2	Diagram alir persiapan file eksekutor .....	32
Gambar 3.3	Diagram alir persiapan data nuklir .....	33
Gambar 3.4	Tampilan awal proses <i>running</i> MCNPX .....	38
Gambar 3.5	File output hasil <i>running</i> .....	39
Gambar 4.1	Model bentuk simulasi terapi pada kanker kulit.....	45
Gambar 4.2	Geometri kulit yang mengalami MM tampak dari depan .....	46
Gambar 4.3	Geometri kulit yang mengalami MM tampak dari atas .....	46
Gambar 4.4	Grafik fluks neutron <i>Vs</i> jaringan .....	54

Gambar 4.5	Grafik dosis serap total .....	57
Gambar 4.6	Grafik waktu iradiasi .....	58



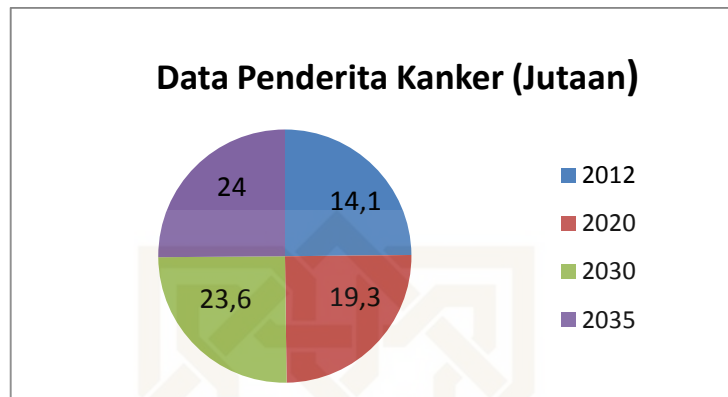
# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Saat ini kanker menjadi perhatian khusus di dunia kesehatan, hal ini karena kanker memiliki sifat *lethal* (mematikan). Kanker atau tumor ganas merupakan pertumbuhan dan perkembangan jaringan tubuh yang tumbuh secara cepat dan tidak terkendali (ACS, 2012). Pertumbuhan yang tidak terkendali ini diakibatkan adanya mutasi gen P53, dimana gen ini berfungsi untuk menekan tumbuhnya tumor. Kerusakan pada gen ini mengakibatkan sel yang mati tidak dapat mengalami *apoptosis* (penghapusan sel-sel mati tanpa melepaskan zat berbahaya) melainkan mengalami perubahan struktur sel (NCBI, 1998).

Kanker merupakan salah satu penyakit penyebab kematian ke-2 yang memberikan kontribusi 13% dari 22% kematian akibat penyakit tidak menular di dunia (Oemiati, 2011). Menurut data IARC, kasus kanker yang terjadi pada tahun 2012 sebesar 14,1 juta dengan angka kematian 8,2 juta jiwa. Sebanyak 7,4 juta terjadi pada pria dan 6,7 juta terjadi pada wanita. Jumlah ini diperkirakan akan terus meningkat dari tahun ke tahun. Kasus kanker yang sering terjadi adalah kanker paru, payudara, *colectrum*, prostat dan perut. Jumlah perkiraan penderita kanker dari tahun 2012 s.d. 2035 disajikan dalam diagram berikut:



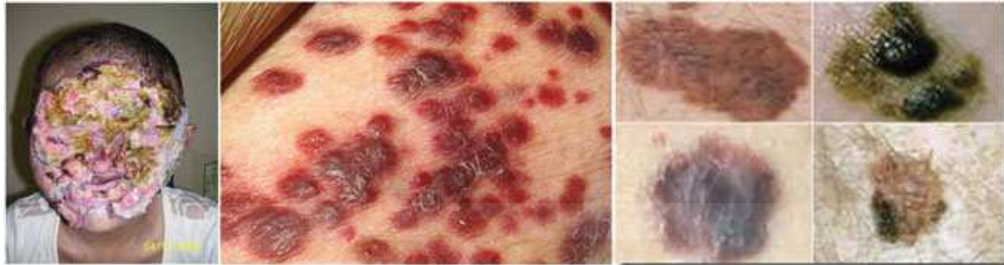
**Gambar 1.1:** Data perkiraan penderita kanker dari tahun 2012 s.d. 2035 (Globocan, 2012)

Kasus kematian akibat kanker di Asia sebanyak 4,5 juta dari 42,5 juta populasi. Dari 244.769.000 populasi di Indonesia terdapat 299.700 kasus kanker dengan kematian akibat kanker sebesar 194.500 jiwa (Globocan, 2012). Di Indonesia kanker merupakan penyebab kematian ke-6 dari pola penyakit nasional dengan prevalensi di tahun 2008 sebesar 1:1000 jiwa. Kasus terbesar terjadi di Yogyakarta yaitu sebesar 9,66%, disusul Jawa Tengah 8,06%, dan Jakarta 7,44%. Pada tahun 2012 mengalami peningkatan menjadi 4,3:1000 (Oemiati, 2011). Menurut data Kementerian Kesehatan Republik Indonesia tahun 2013, kasus kanker tertinggi terjadi di Yogyakarta yaitu sebesar 41%, disusul Jawa Tengah 21%, dan Bali 20% (Kemenkes RI, 2012).

Berdasarkan data yang dirilis oleh *International Agency for Research on Cancer* (IARC), pada tahun 2012 terdapat 232.130 jiwa kasus kanker kulit dengan angka kematian sebesar 55.289 jiwa (0,7% dari total angka kematian). Indonesia mencatat adanya 658 kasus kanker kulit dengan angka kematian sebesar 335 jiwa (IARC, Globocan 2012). Menurut data dari *American Cancer Society* (ASC)

jumlah ini jauh lebih rendah dibanding dengan negara Amerika yang mencapai 81.220 kasus dengan angka kematian sebesar 12.980 jiwa di tahun 2014 (ACS, 2012).

Kanker kulit merupakan kanker yang terjadi pada kulit epidermis. Kanker kulit terbagi menjadi 2 yaitu non-melanotik dan melanotik (melanoma). Kanker non-melanotik terbagi menjadi karsinoma sel basal (KSB) dan karsinoma sel skuomosa (KSS). Kanker basal merupakan kanker yang paling sering ditemukan, umumnya terjadi di daerah wajah dan paling banyak terjadi pada kulit putih yang minim pelindung terhadap sinar ultraviolet matahari. Kanker jenis skuomosa tumbuh dan berkembang lebih cepat dibanding dengan sel basal dan bermetastase sekitar 2%. Sedangkan kanker jenis *melanoma maligna* (MM) merupakan jenis kanker yang lebih berbahaya dibandingkan dengan kanker jenis non-melanomatik. Hal ini karena kanker dapat menyerang jaringan di dekatnya dan menyebar kebagian lain dari bagian tubuh. Dari 4% kanker kulit terdapat 79% kematian yang disebabkan oleh jenis kanker *melanoma maligna*. Kanker jenis ini berasal dari melanosit yaitu sel kulit yang menghasilkan pigmen melanin dengan gambaran berupa lesi kehitam-hitaman. Kanker ini sering terjadi pada usia 30-60 tahun dengan frekuensi sama antara pria dan wanita (Pasaribu, 2006). Berikut visualisasi penderita kanker kulit:



**Gambar 1.2:** Penderita kanker kulit (NCI, 2015)

Beberapa bentuk pengobatan untuk kanker kulit telah banyak dilakukan, namun masih belum optimal dalam membunuh kanker. Eksisi bedah, *elective lymph node dessection* (ELND), *interferon a 2b*, kemoterapi, kemoterapi perfusi dan terapi radiasi terbukti mampu membunuh kanker kulit, namun dari beberapa metode tersebut masih belum efektif. Hal ini terlihat dari tingkat toksisitasnya yang tinggi hingga kerusakan pada jaringan sehat disekitarnya yang dialami oleh pasien pasca terapi (Putra, 2008). Oleh karena itu perlu adanya pengobatan kanker dengan *selective targeting* yang mampu membunuh sel kanker secara optimum dengan resiko bahaya yang kecil pada sel sehat disekitarnya. Metode pengobatan kanker dengan *selective targeting* yang baru dikembangkan di Indonesia saat ini adalah *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT).

BNCT merupakan terapi radiasi tertarget untuk membunuh kanker baik yang bersifat *maligna* (ganas) maupun *begigna* (jinak). Teknik ini pertama kali dikenalkan oleh G.L. Louchter, seorang Fisikawan di *Pennsyvania* pada tahun 1936. (Y.C.Lin, 2011). Terapi dengan BNCT mempunyai kelebihan dibandingkan dengan terapi kanker secara konvensional. Adapun kelebihan dari teknik BNCT adalah sebagai berikut (IAEA, 2001) :

1. Konsentrasi boron yang digunakan tidak bersifat racun
2. Hanya jaringan yang terletak disekitar volume tumor yang akan rusak ketika boron teraktivasi oleh neutron.
3. Interval waktu antara pemberian obat dan iradiasi neutron dapat ditentukan untuk memaksimalkan distribusi boron dalam sel kanker dan jaringan normal.

Perhitungan dosis pada terapi BNCT merupakan salah satu faktor terpenting dalam keberhasilan terapi BNCT. Oleh karena itu diperlukan simulasi dan metode numerik untuk menghitung dosimetri pada terapi BNCT. Metode *Monte Carlo* merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menduplikasi secara teoritis proses statistik dan secara khusus dapat digunakan untuk permasalahan yang kompleks yang tidak dapat dimodelkan dengan metode deterministik [X-5 *Monte Carlo Team*, 2003]. *Monte Carlo N-Particle version X* (MCNPX) merupakan *software* analisa transfer radiasi berbasis *Monte Carlo* yang didesain untuk simulasi jejak berbagai tipe partikel dengan jangkauan energi yang luas. Versi ini adalah versi lanjutan dari MCNP yang telah dimulai di *Los Alamos National Laboratory* sekitar enam puluh tahun yang lalu.

Beberapa *tally* (mode perhitungan) dan metode baru reduksi varians pada MCNPX telah dikembangkan untuk teknik analisis data yang lebih baik. Beberapa penambahan dari versi baru ini juga meliputi *Cascade-Exciton Model (CEM)*, dari *Los Alamos Quark-Gluon String Model (LAQGSM)* dan analisis partikel muon (partikel elementer). MCNPX ini juga kompatibel untuk menjalankan kode dari MCNP5 dan mampu menghitung partikel sebanyak 36 jenis. Ini berbeda dengan

MCNP5 yang hanya mampu menghitung 3 jenis partikel yaitu elektron, neutron, dan proton (Pelowitz, 2008).

Dalam perhitungan dosis BNCT dengan MCNPX, terlebih dahulu harus dibuat model geometri untuk mensimulasikan organ yang mengidap suatu kanker. Pembuatan geometri sangat penting karena berkaitan dengan bentuk volume yang akan dihitung oleh MCNPX. Geometri dibuat dengan ukuran dan jenis material penyusun sesuai dengan organ yang sesungguhnya. Ini bertujuan untuk mendapatkan hasil dosis yang tepat ketika akan diujikan secara klinis.

Partikel yang berperan dalam BNCT merupakan partikel yang tidak kasat mata, yaitu berupa boron dan neutron. Dalam Al-Qur'an neutron dan boron disebutkan dengan istilah "dzarrah" yang diartikan dengan butir yang sangat kecil atau biji sawi. Istilah "dzarrah" oleh para ulama juga diartikan sebagai atom, sebagaimana tertuang dalam ayat berikut:

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْءَانٍ وَلَا تَعْمَلُونَ مِنْ عَمَلٍ إِلَّا كُنَّا عَلَيْكُمْ شُهُودًا إِذْ تُفِيضُونَ فِيهِ ۗ وَمَا يَعْزُبُ عَنْ رَبِّكَ مِنْ مِثْقَالِ ذَرَّةٍ فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ وَلَا أَصْغَرَ مِنْ ذَلِكَ وَلَا أَكْبَرَ إِلَّا فِي كِتَابٍ مُبِينٍ ﴿٦٦﴾

Artinya: "Kamu tidak berada dalam suatu Keadaan dan tidak membaca suatu ayat dari Al Quran dan kamu tidak mengerjakan suatu pekerjaan, melainkan Kami menjadi saksi atasmu di waktu kamu melakukannya, tidak luput dari pengetahuan Tuhanmu biarpun sebesar zarrah (atom) di bumi ataupun di langit.



tidak ada yang lebih kecil dan tidak (pula) yang lebih besar dari itu, melainkan (semua tercatat) dalam kitab yang nyata (Lauh Mahfuzh)” (Q.S. Yunus:61).

Sejak 15 abad yang lalu sebelum ditemukannya atom, Al-Qur'an telah mengisyaratkan tentang *dzarrah* atau atom yang berukuran sangat kecil. Meskipun tidak disebutkan secara langsung berapa kecil ukuran atom, namun di ayat lain Allah menegaskan bahwa atom tetap mempunyai ukuran. Ini sebagaimana tertuang dalam ayat berikut:

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ ﴿٤٩﴾

Artinya: “*Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran*” (Q.S. Al-Qomar:49).

Ayat diatas menegaskan bahwa semua benda yang diciptakan Allah, baik yang terlihat maupun yang tidak terlihat tentu memiliki ukuran, termasuk atom yang memiliki ukuran sebesar  $10^{-8}$  cm (Wardhana, 2004).

## 1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana geometri yang digunakan untuk simulasi pengobatan pada kanker kulit dengan menggunakan MCNPX?
2. Berapa dosis serap  $^{10}\text{B}$  sel sehat disekitar sel kanker?
3. Berapa energi kolimator yang dapat digunakan dengan resiko kerusakan pada sel sehat yang paling kecil dan waktu iradiasi yang dibutuhkan?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mensimulasikan geometri kulit yang mengidap kanker dengan software MCNPX
2. Menghitung dosis serap  $^{10}\text{B}$  pada sel sehat disekitar sel kanker
3. Menentukan energi kolimator dan waktu iradiasi yang digunakan dengan resiko kerusakan pada jaringan sehat yang paling kecil

### 1.4. Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi oleh:

1. Jenis kanker yang dipilih adalah kanker *melanoma maligna* (MM)
2. Semua boron terletak di sel kanker
3. Neutron yang digunakan merupakan neutron termal
4. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan MCNPX
5. Kanker terletak pada lengan tangan bagian atas.

### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Melanjutkan proyek besar dalam pemanfaatan dan penggunaan teknologi BNCT untuk terapi kanker di Indonesia
2. Sebagai salah satu solusi untuk pengobatan kanker yang tidak merusak sel sehat disekitarnya.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil simulasi geometri kulit yang mengalami *melanoma maligna* (MM) dengan software MCNPX dapat dilihat pada gambar 4.1
2. Dosis serap  $^{10}\text{B}$  pada jaringan sehat ( Epidermis, Dermis, PTV, dan CTV ) adalah 3,54 Gy, 4,12 Gy, 8,43 Gy, 9,46 Gy.
3. Energi kolimator dan waktu iradiasi yang digunakan dengan resiko kerusakan pada jaringan sehat yang paling kecil adalah adalah 10 MeV dengan waktu iradiasi 26,6 menit.

#### 5.2. Saran

Setelah dilakukan penelitian saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah perlu melakukan variasi konsentrasi  $^{10}\text{B}$  yang digunakan untuk iradiasi, menggunakan sumber neutron lain misalnya CNG (*Compact Neutron Generator*), lokasi kanker kulit berada diorgan lain.

## DAFTAR PUSTAKA

- A. Dragosa, *et al.* 2011. Studies for the Application of Boron Neutron Capture Therapy to the Treatment of Differentiated Thyroid Cancer. *Applied Radiation and Isotopes*. **69 (2011)** : 1752-1755
- Acs. 2012. *Cancer Fact & Figures 2012*. Atlanta: Amerika Cancer Society (ACS)
- Alobity, Muhammad. 2012. *Boron Neutron Capture Therapy for Cancer Treatment*. (Disertasi). Jurusan Fisika. Universitas Surrey
- Barth, Rolf. F, *et al.* 2012. Current Status of Boron Neutron Capture Therapy of High Grade Gliomas and Recurrent Head and Neck Cancer. *Radiation Oncology* **7 (2012)** : 146
- Deng, Li, *et al.* 2011. *The Dosimetry Calculation for Boron Neutron Capture Therapy*. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
- E.Roda, *et al.* 2014. Blood-Brain Barrier (BBB) Toxicity and Permeability Assesment after L-4(<sup>10</sup>Boronpheny)alanine, a Conventional B-containing Drug for Boron Neutron Capture Therapy, Using an In Vitro BBB Model. *Brain Research*. **1583 (2014)** : 34-44
- Farias, Ruben O *et al.* 2014. Exploring Boron Neutron Capture Therapy for Non-Small Cell Lung. *Physica Medica*. **30 (2014)** : 888-897
- Floberg, John M. 2005. *The Physics of Boron Neutron Therapy: an Emerging and Innovative Treatment for Glioblastoma and Melanoma*. (Cops Papers), Fakultas Fisika dan Astronomi, Universitas Carleton
- Garabalino, Marcela A, *et al.* 2010. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for The Treatment of Liver Metastases: Biodistribution studies of Boron Compounds in an Experimental Model. *Radiat Environ Biophys.* (2011) **50** : 199-207
- GLOBOCAN. 2012. *Estimated Cancer Incidence, Mortality and Prevalence Worldwide in 2012*. International Agency for Research of Cancer (IARC)
- Huang, Junjie. 2009. *Boron Neutron Capture Therapy for Cancer Treatments*. (Desertasi). Fakultas Elektronik dan Pengetahuan Alam Universitas Surrey
- Hiratsuka, Junichi dan Hiroshi Fukuda. 2012. *Melanoma Maligna (MM)*. Springer International Publishing AG (2012)
- IAEA. 2001. *Current Status of Neutron Capture Therapy*. Vienna: International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1223
- Irhas. 2014. *Dosimetri Boron Neutron Capture Therapy pada Kanker Hati (Hepatocellular Carcinoma) Menggunakan MCNP-Code dengan Sumber Neutron dari Kolom Termal Kartini*. (Skripsi). Jurusan Teknik Nuklir Fakultas Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

- Kemenkes RI. 2014. *Profil Kesehatan Indonesia Tahun 2013*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia
- Laraa, Siti Halijah. 2014. *Pemodelan Kolimator untuk Boron Neutron Capture Therapy dengan Sumber Compact Neutron Generator Menggunakan Monte Carlo N-Particle Versi 5*. (Skripsi). Program Studi Fisika
- Melanoma Treatment. Diakses pada 31 Agustus 2015 dari <http://www.cancer.gov/types/skin/patient/melanoma-treatment-pdq>
- Mirzaei, Davood, *et al.* 2014. Depth Dose Evaluation for Prostate Cancer Treatment Using Boron Neutron Capture Therapy. *J Radioanal Nucl Chem.* (2014) **302** : 1095-1101
- Mofakham, N.Nassiri, *et al.* 2014. Monte Carlo Design Study of a System for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) by Monte Carlo. *National Park-Forschung*. Vol.103 No.1 January 2014
- NCBI. 1998. *The P53 Tumor Suppressor Protein*. Diakses 30 April 2015 dari <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK22268/>
- NCI. 2015. *Melanoma and Other Skin Cancer*. Diakses 5 November 2015 dari <http://www.cancer.gov/espanol>
- Oemati, Ratih, *et al.* 2011. Prevalensi Tumor dan Beberapa Faktor yang Mempengaruhinya di Indonesia. *Bul. Peneliti Kesehatan*. **Vol.4, 2011** : 190-204
- Olsson L, *et al.* 2012. Boron Compounds Useful in BNCT. *United States Patent*. **USB,183,247 B2**
- Pasaribu, Emir T. 2006. *Kontroversi Profeliksisi Elektif Node Diseksi dalam Penanganan Melano Maligna*. Diakses 9 Juni 2015 dari [http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/15642/1/mkn-des2006-%20\(10\).pdf](http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/15642/1/mkn-des2006-%20(10).pdf)
- Pelowitz, Denise B. 2008. *MNCPX<sup>TM</sup> User's Manual Version 2.6.0*. LA-CP-07-1473. New York: Los Alamos National Laboratory
- Putra, Imam Budi. 2008. *Tumor Kulit yang Berasal dari Melanocytes System*. Diakses 25 April 2015 dari <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/3435/1/08E00071.pdf>
- Saurewein, Wolfgang A.G, *et al.* 2012 *Neutron Capture Therapy*. New York: Springer
- Savolainen, Sauli, *et al.* 2013. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) in Finland: Technological and Physical Prospects after 20 Years of Experiences. *Physica Medica*. (2013) **29** : 233-248

- Setiyadi, Andhika. 2015. *Dosis Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) pada Kanker Kulit (Melanoma Maligna) Menggunakan MCNPX-code dengan Sumber Neutron dari Beamport Tembus Reaktor Kartini*. (Skripsi). Fisika FMIPA UNY.
- Siwi, Dwi Berlianti. 2013. *Analisis Dosis di Organ Kritis pada Glioblastoma dengan boron Neutron Capture Therapy Menggunakan Simulasi MCNP5*. (Skripsi). Jurusan Teknik Nuklir Fakultas Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada Yogyakarta
- V.A. Trivillin, *et al.* 2012. Biodistribution of the Boron Carriers Boronophenylalanine (BPA) and or Decahydrodecaborate (GB-10) for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) in an Experimental Model of Lung Metastases. *Applied Radiation and Isotopes*. **88 (2014)** : 94-98
- Wardhana. Wisnu. 2004. *Alqur'an dan Energi Nuklir*. Pustaka Pelajar: Yogyakarta
- X-5 Monte Carlo Team. *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5 Volume 1: Overview and Theory*. LA-UR-03-1987. New York: Los Alamos National Laboratory
- Y.C, Lin, *et all.* Low Dose of Gamma Irradiation Enhanced Boronophenylalanine uptake in Head and Neck Carcinoma Cells for Boron Neutron Capture Therapy. *Applied Radiation and Isotopes*. **69 (2011)**: 1728-1731
- Yasui, Linda, *et al.* 2012. Boron Neutron Capture in Prostate Cancer Cells. *Applied Radiation and Isotopes*. **70 (2012)** : 6-12

## LAMPIRAN I

### Source code

```
c Created on: Thursday, November 10, 2016 at 16:47
c cell card
1 7 -0.001205 2 -5 -17 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
2 6 -1.85 17 -6 -5 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
3 1 -3.95 6 -7 -5 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
4 2 -2.7 7 -5 -8 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
5 7 -0.001205 8 -9 -5 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
6 4 -8.9 9 -10 -5 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
7 7 -0.001205 10 -11 -14 -5 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
8 5 -8.9 11 -12 -14 -5 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
9 7 -0.001205 12 -13 -14 -5 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
10 3 -11.35 (2 -4 5 -13):(16 -4 14 -13) imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
11 7 -0.001205 1 -3 -13 (4 :-2 :-1) imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
12 12 -0.00129 -18 (-1 :3 :13)#14 #15 #16 #17 #18 &
    imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
13 0 18 imp:n=0 imp:p=0 imp:h=0
14 8 -1.144 -19 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
15 9 -1.04 19 -20 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
16 10 -1.04 20 -21 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
17 11 -1.04 21 -22 -23 24 imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
18 11 -1.04 -25 -26 27 (23 :22 :-24) imp:n=1 imp:p=1 imp:h=1
c surface card
1 px -15
2 px 0
3 cx 30
4 cx 20
5 cx 12
6 px 20
7 px 22
```

8	px 24			
9	px 34			
10	px 36			
11	px 80			
12	px 85			
13	px 90			
14	kx 95.33 0.36 -1			
16	px 75			
17	px 15			
18	rcc -20 0 0 140 0 0 35			
19	sx 96 2			
20	sx 96 2.5			
21	sx 96 3			
22	c/z 96 0 5			
23	pz 10			
24	pz -10			
25	c/z 96 0 5.5			
26	pz 10.5			
27	pz -10.5			
c	material card			
mode	n p h			
m1	13027.60c	2		
	8016.60c	3		
m2	13027.60c	1		
m3	6012.50c	1		
m4	48000.50c	1		
m5	28000.50c	1		
m6	4009.60c	1		
m7	7014.60c	0.78084		
	8016.60c	0.2094 18000.59c	0.00976	
m8	1001.60c	-0.009899802 \$kanker		
	6012.50c	-0.2689946 7014.60c	-0.00449991 8016.60c	-0.5689886



15031.60c -0.01799964 5010.60c -1.99996e-005  
 m9 1001.60c -0.009899802 \$CTV  
 6012.50c -0.2689946 7014.60c -0.00449991 8016.60c -0.5689886  
 15031.60c -0.01799964 5010.60c -5.88825e-006  
 m10 1001.60c -0.1069997 \$PTV  
 6012.50c -0.1449995 7014.60c -0.02199989 8016.60c -0.7119977  
 11023.60c -0.001999995 15031.60c -0.003999987 16032.60c -0.001999999  
 17000.60c -0.002999999 19000.60c -0.002999999 5010.60c -2.7619e-006  
 m11 1001.60c -0.09999999 \$kulit  
 6012.50c -0.204 7014.60c -0.042 8016.60c -0.6449999  
 11023.60c -0.002 15031.60c -0.001 16032.60c -0.002  
 17000.60c -0.003 19000.60c -0.001 12000.60c -0.00013  
 14000.50c -0.0003 20000.60c -0.00024 26000.50c -5e-005  
 30000.40c -3e-005 37085.55c -1e-005 40000.60c -1e-005  
 m12 7014.60c -0.7818  
 8016.60c -0.2097 18000.59c -0.0085  
 c data card  
 sdef POS=-12.2 0 0 PAR=9 ERG=15 DIR=1 VEC=1 0 0 \$posisi sumber  
 c tally card  
 F4:n 14 15 16 17 18 \$dosis neutron  
 fm4 6.9e15  
 e4 5e-7 0.01 30  
 f24:n 14 15 16 17 18  
 fm24 6.9e15  
 de24 0.01 0.011 0.02 0.036 0.063 0.082  
 0.086 0.09 0.094 0.098 0.105 0.115  
 0.125 0.135 0.145 0.155 0.165 0.175  
 0.185 0.195 0.21 0.23 0.25 0.27  
 0.29 0.31 0.33 0.35 0.37 0.39  
 0.42 0.46 0.5 0.54 0.58 0.62  
 0.66 0.7 0.74 0.78 0.82 0.86  
 0.9 0.94 0.98 1.05 1.15 1.25

1.35 1.45 1.55 1.65 1.75 1.85  
 1.95 2.1 2.3 2.5 2.7 2.9  
 3.1 3.3 3.5 3.7 3.9 4.2  
 4.6 5 5.4 5.8 6.2 6.6  
 7 7.4 7.8 8.2 8.6 9  
 9.4 9.8 10.5 11.5 12.5 13.5  
 14.5 16 18 20  
 df24 1e-100 1.09e-12 1.88e-12 3.11e-12 4.82e-12  
 5.86e-12 6.05e-12 6.24e-12 6.44e-12 6.62e-12  
 6.92e-12 7.35e-12 7.76e-12 8.13e-12 8.50e-12  
 8.86e-12 9.19e-12 9.51e-12 9.83e-12 1.01e-11  
 1.06e-11 1.11e-11 1.16e-11 1.21e-11 1.27e-11  
 1.31e-11 1.36e-11 1.41e-11 1.46e-11 1.52e-11  
 1.66e-11 1.64e-11 1.65e-11 1.71e-11 1.77e-11  
 1.83e-11 1.89e-11 1.95e-11 2e-11 2.06e-11  
 2.11e-11 2.16e-11 2.23e-11 2.33e-11 2.5e-11  
 2.52e-11 2.52e-11 2.63e-11 2.71e-11 2.76e-11  
 2.83e-11 2.94e-11 2.99e-11 3.12e-11 3.13e-11  
 3.24e-11 3.29e-11 3.44e-11 3.59e-11 3.75e-11  
 3.85e-11 4.19e-11 4.29e-11 4.4e-11 4.33e-11  
 4.43e-11 4.43e-11 4.68e-11 4.57e-11 5.47e-11  
 4.92e-11 5.07e-11 5.19e-11 5.42e-11 5.47e-11  
 5.41e-11 5.56e-11 5.66e-11 5.83e-11 5.96e-11  
 6.01e-11 6.38e-11 6.38e-11 6.54e-11 6.61e-11  
 6.77e-11 6.95e-11 7.04e-11  
 f34:p 14 15 16 17 18 \$dosis photon  
 fm34 1.25e16  
 de34 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.004 0.005  
 0.006 0.008 0.01 0.015 0.02 0.03 0.04  
 0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 0.2 0.3 0.4 0.5  
 0.6 0.8 1 1.25 1.5 2 3 4 5 6 8 10 15 20  
 df34 5.63e-10 2.83e-10 1.68e-10 8.07e-11 4.7e-11

3.02e-11 2.09e-11 1.16e-11 7.24e-12 3.04e-12  
1.64e-12 7.02e-13 4.23e-13 3.25e-13 2.98e-13  
3.27e-13 4.03e-13 6.61e-13 9.43e-13 1.52e-12  
2.09e-12 2.62e-12 3.13e-12 4.08e-12 4.93e-12  
5.89e-12 6.76e-12 8.29e-12 1.09e-11 1.31e-11  
1.52e-11 1.71e-11 2.09e-11 2.47e-11 3.39e-11 4.33e-11  
nps 10000000



## LAMPIRAN II

Specific Absorbed Fraction of Photon Energy in kg-1: Recommended Values for the Adult Male

Source = Skin	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Target	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100	0.200	0.500	1.000	1.500	2.000	4.000
Adrenals 0.0	5.62E-06	1.70E-04	1.06E-03	1.70E-03	1.66E-03	1.65E-03	1.62E-03	1.55E-03	1.42E-03	1.31E-03	1.22E-03	1.76E-03
LB Wall 4.45E-06	7.71E-05	5.83E-04	1.83E-03	2.23E-03	2.07E-03	2.08E-03	2.06E-03	1.95E-03	1.79E-03	1.71E-03	1.63E-03	1.83E-03
Bone Sur 1.56E-03	4.63E-03	8.32E-03	1.30E-02	1.27E-02	6.92E-03	4.44E-03	3.76E-03	3.63E-03	3.55E-03	3.13E-03	2.81E-03	2.81E-03
Brain 2.57E-06	2.61E-05	1.35E-04	1.37E-03	2.17E-03	1.94E-03	2.11E-03	2.39E-03	2.45E-03	2.34E-03	2.26E-03	1.75E-03	1.75E-03
Breasts 9.52E-03	1.58E-02	1.66E-02	1.11E-02	5.13E-03	3.48E-03	1.82E-03	1.10E-03	4.88E-03	4.04E-03	3.87E-03	3.70E-03	3.13E-03
St Wall 3.22E-06	5.90E-05	4.65E-04	1.71E-03	1.90E-03	1.73E-03	1.83E-03	2.10E-03	1.97E-03	1.88E-03	1.81E-03	1.62E-03	1.62E-03
SI Wall 1.11E-09	7.69E-07	7.98E-05	7.14E-04	1.41E-03	1.48E-03	1.52E-03	1.69E-03	1.79E-03	1.83E-03	1.80E-03	1.50E-03	1.50E-03
ULI Wall 1.88E-08	3.82E-06	1.66E-04	8.32E-04	1.50E-03	1.48E-03	1.48E-03	1.60E-03	1.80E-03	1.81E-03	1.75E-03	1.69E-03	1.52E-03
ULI Wall 6.14E-08	2.67E-04	5.67E-04	1.27E-03	2.00E-03	1.90E-03	1.91E-03	2.04E-03	2.10E-03	2.00E-03	1.91E-03	1.79E-03	1.79E-03
Kidneys 1.48E-05	1.82E-04	1.08E-03	2.43E-03	2.15E-03	1.84E-03	1.98E-03	2.37E-03	2.36E-03	2.36E-03	2.15E-03	1.98E-03	1.80E-03
Liver 1.33E-06	4.11E-05	4.69E-04	1.68E-03	2.01E-03	1.79E-03	1.79E-03	2.04E-03	2.23E-03	2.23E-03	2.12E-03	1.99E-03	1.75E-03
ETI-bas 0.0	2.45E-05	5.08E-04	2.22E-03	2.45E-03	2.11E-03	2.27E-03	2.39E-03	2.49E-03	2.42E-03	2.28E-03	2.28E-03	1.79E-03
ETI-bas 0.0	2.45E-05	5.08E-04	2.22E-03	2.45E-03	2.11E-03	2.27E-03	2.39E-03	2.49E-03	2.42E-03	2.28E-03	2.28E-03	1.79E-03
LM-ST 0.0	2.45E-05	5.08E-04	2.22E-03	2.45E-03	2.11E-03	2.27E-03	2.39E-03	2.49E-03	2.42E-03	2.28E-03	2.28E-03	1.79E-03
BBI-bas 1.27E-06	4.37E-05	5.36E-04	2.17E-03	2.47E-03	1.98E-03	2.02E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.19E-03	2.14E-03	1.78E-03	1.78E-03
BBI-sec 1.27E-06	4.37E-05	5.36E-04	2.17E-03	2.47E-03	1.98E-03	2.02E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.19E-03	2.14E-03	1.78E-03	1.78E-03
bce-sec 1.27E-06	4.37E-05	5.36E-04	2.17E-03	2.47E-03	1.98E-03	2.02E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.19E-03	2.14E-03	1.78E-03	1.78E-03
AI 1.27E-06	4.37E-05	5.36E-04	2.17E-03	2.47E-03	1.98E-03	2.02E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.19E-03	2.14E-03	1.78E-03	1.78E-03
LN-Th 1.27E-06	4.37E-05	5.36E-04	2.17E-03	2.47E-03	1.98E-03	2.02E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.19E-03	2.14E-03	1.78E-03	1.78E-03
Lug_TIBR 1.27E-06	4.37E-05	5.36E-04	2.17E-03	2.47E-03	1.98E-03	2.02E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.19E-03	2.14E-03	1.78E-03	1.78E-03
Lung NP 0.0	2.45E-05	5.08E-04	2.22E-03	2.45E-03	2.11E-03	2.27E-03	2.39E-03	2.49E-03	2.42E-03	2.28E-03	2.28E-03	1.79E-03
Lung_TB 1.27E-06	4.37E-05	5.36E-04	2.17E-03	2.47E-03	1.98E-03	2.02E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.19E-03	2.14E-03	1.78E-03	1.78E-03
Lung_P 1.27E-06	4.37E-05	5.36E-04	2.17E-03	2.47E-03	1.98E-03	2.02E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.19E-03	2.14E-03	1.78E-03	1.78E-03
Muscle 3.85E-03	5.95E-03	6.49E-03	5.39E-03	3.57E-03	2.73E-03	2.87E-03	3.18E-03	3.09E-03	3.09E-03	2.93E-03	2.79E-03	2.42E-03
Ovaries 0.0	1.39E-08	1.40E-05	3.76E-04	1.31E-03	1.46E-03	1.57E-03	1.70E-03	1.60E-03	1.60E-03	1.68E-03	1.59E-03	1.56E-03
Pancreas 0.0	1.23E-07	1.25E-05	4.22E-04	1.36E-03	1.48E-03	1.47E-03	1.68E-03	1.68E-03	1.76E-03	1.66E-03	1.57E-03	1.47E-03
R_Marrow 3.59E-04	9.37E-04	1.49E-03	2.02E-03	2.11E-03	2.05E-03	2.19E-03	2.44E-03	2.39E-03	2.33E-03	2.26E-03	1.96E-03	1.96E-03
Skin 2.26E-01	1.18E-01	6.31E-02	2.46E-02	9.25E-03	5.99E-03	6.82E-03	7.57E-03	7.40E-03	6.95E-03	6.52E-03	5.38E-03	5.38E-03
Spleen 5.87E-07	2.12E-05	2.70E-04	1.39E-03	1.96E-03	1.73E-03	1.78E-03	2.08E-03	2.16E-03	2.07E-03	1.96E-03	1.59E-03	1.59E-03
Testes 1.40E-03	8.06E-03	1.43E-02	1.34E-02	7.49E-03	4.68E-03	5.15E-03	5.49E-03	5.31E-03	4.71E-03	4.28E-03	3.69E-03	3.69E-03
Thymus 1.58E-07	1.67E-04	1.07E-03	2.71E-03	2.62E-03	2.15E-03	2.30E-03	2.62E-03	2.65E-03	2.65E-03	2.44E-03	1.97E-03	1.97E-03
Thyroid 0.0	2.45E-05	5.08E-04	2.22E-03	2.45E-03	2.11E-03	2.27E-03	2.39E-03	2.49E-03	2.42E-03	2.28E-03	2.28E-03	1.79E-03
GB Wall 3.43E-09	1.59E-06	1.23E-04	7.56E-04	1.51E-03	1.49E-03	1.59E-03	1.67E-03	1.67E-03	1.75E-03	1.77E-03	1.62E-03	1.62E-03
Ht_Wall 1.01E-05	9.27E-05	4.47E-04	1.38E-03	1.89E-03	1.79E-03	1.87E-03	2.01E-03	2.01E-03	2.10E-03	1.96E-03	1.85E-03	1.81E-03
Uterus 0.0	2.52E-07	4.40E-05	5.66E-04	1.37E-03	1.54E-03	1.53E-03	1.73E-03	1.65E-03	1.65E-03	1.63E-03	1.78E-03	1.55E-03

### LAMPIRAN III

Perhitungan Fraksi Massa Boron pada Jaringan dengan konsentrasi 20 µg/g tumor

#### 1. Kanker

$$\begin{aligned}V &= 33,5103 \text{ cm}^3 \\ \rho &= 1,144 \text{ gram/cm}^3 \\ m_{\text{tumor}} &= V \times \rho \\ &= 33,5103 \times 1,144 \\ &= 38,3358 \text{ gram} \\ m_{\text{Boron-10}} &= 20 \times 10^{-6} \text{ g/gram tumor} \times 38,3358 \text{ g} \\ &= 7,66714 \times 10^{-4} \text{ gram} \\ \text{Fraksi } m_{\text{boron}} &= \frac{m_{\text{boron-10}}}{m_{\text{boron-10}} + m_{\text{tumor}}} \\ &= \frac{7,66714 \times 10^{-4}}{7,66714 \times 10^{-4} + 38,3358} \\ &= 1,99996 \times 10^{-5}\end{aligned}$$

#### 2. Clinical Tumor Volume (CTV)

$$\begin{aligned}V &= 31,9395 \text{ cm}^3 \\ \rho &= 1,04 \text{ gram/cm}^3 \\ m_{\text{CTV}} &= V \times \rho \\ &= 31,9395 \times 1,04 \\ &= 33,2171 \text{ gram} \\ \text{Fraksi } m_{\text{boron}} &= \frac{m_{\text{boron-10}}}{m_{\text{boron-10}} + m_{\text{CTV}}} \\ &= \frac{7,66714 \times 10^{-4}}{7,66714 \times 10^{-4} + 33,2171} \\ &= 2,30814 \times 10^{-5}\end{aligned}$$

#### 3. Planing Tumor Volume (PTV)

$$\begin{aligned}V &= 47,6475 \text{ cm}^3 \\ \rho &= 1,04 \text{ gram/cm}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{PTV} &= V \times \rho \\
 &= 47,6475 \times 1,04 \\
 &= 49,5534 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fraksi } m_{\text{boron}} &= \frac{m_{\text{boron-10}}}{m_{\text{boron-10}} + m_{PTV}} \\
 &= \frac{7,66714 \times 10^{-4}}{7,66714 \times 10^{-4} + 49,5534} \\
 &= 1,54723 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

#### 4. Kulit bagian dalam

$$\begin{aligned}
 V &= 1,4577 \times 10^3 \text{ cm}^3 \\
 \rho &= 1,04 \text{ gram/cm}^3 \\
 m_{\text{kulit}} &= V \times \rho \\
 &= 1,4577 \times 10^3 \times 1,04 \\
 &= 1,51601 \times 10^3 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fraksi } m_{\text{boron}} &= \frac{m_{\text{boron-10}}}{m_{\text{boron-10}} + m_{\text{kulit}}} \\
 &= \frac{7,66714 \times 10^{-4}}{7,66714 \times 10^{-4} + 1,51601 \times 10^3} \\
 &= 5,05746 \times 10^{-7}
 \end{aligned}$$

#### 5. Kulit bagian luar

$$\begin{aligned}
 V &= 4,249 \times 10^2 \text{ cm}^3 \\
 \rho &= 1,04 \text{ gram/cm}^3 \\
 m_{\text{kulit}} &= V \times \rho \\
 &= 4,249 \times 10^2 \times 1,04 \\
 &= 4,41896 \times 10^2 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fraksi } m_{\text{boron}} &= \frac{m_{\text{boron-10}}}{m_{\text{boron-10}} + m_{\text{kulit}}} \\
 &= \frac{7,66714 \times 10^{-4}}{7,66714 \times 10^{-4} + 4,41896 \times 10^2} \\
 &= 1,73506 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

## LAMPIRAN IV

### Perhitungan Laju Dosis

Contoh perhitungan perhitungan laju dosis tiap komponen dan laju dosis total pada kanker pada energi 10 MeV

1. Laju dosis hamburan neutron

$$\dot{D} = 2,94524 \times 10^{-4} \frac{Gy}{detik}$$

2. Laju dosis sinar gamma ( $\gamma$ )

a. Dosis dari dalam reaktor

$$\dot{D} = 3,65334 \times 10^{-4} \frac{Gy}{detik}$$

b. Dosis dari reaksi neutron dengan materi jaringan kanker 1,13988E+08

$$\Phi = 1,13988 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_{\text{kanker}} = 38,3358 \text{ gram}$$

$$= 38,3358 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$m_{\text{Hidrogen}} = \text{fraksi Hidrogen} \times m_{\text{kanker}}$$

$$= 9,8990 \times 10^{-2} \times 38,3358 \text{ g}$$

$$= 3,7951 \text{ g}$$

$$N_{\text{Hidrogen}} = \frac{\left(\frac{m}{Ar}\right)_{\text{Hidrogen}} \times 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{m_{\text{tumor}}}$$

$$= \frac{\left(\frac{3,7951}{2}\right) \times 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{38,3358 \times 10^{-3}}$$

$$= 2,98133 \times 10^{25} \text{ atom/kg}$$

Laju pelepasan sinar  $\gamma$  yang dihasilkan didalam kanker adalah

$$\sigma_{H-1} = 3,31960 \times 10^{-25}$$

$$\ddot{R} = \Phi \cdot N_{\text{Hidrogen-tumor}} \cdot \sigma_{H-1}$$

$$= 1,13988 \times 10^8 \times 2,98133 \times 10^{25} \times 3,31960 \times 10^{-25}$$

$$= 2,62321 \times 10^{10} \text{ Bq/kg}$$

$$\Delta = 2,33 \frac{MeV}{\gamma} \times 1,6 \times 10^{-13}$$

$$= 3,568 \times 10^{-13} \frac{\text{Gy/detik}}{\text{Bq/kg}}$$

$$\phi = 6,37 \times 10^{-3} \text{ (dari tabel pada lampiran II untuk sumber gamma berenergi 2,23 MeV berada dikulit dan dengan target kulit)}$$

$$\begin{aligned} \dot{D} &= \ddot{R} \Delta \phi \\ &= 2,62321 \times 10^{10} \times 3,568 \times 10^{-13} \times 6,37 \times 10^{-3} \\ &= 5,96207 \times 10^{-5} \text{ Gy/s} \end{aligned}$$

### 3. Laju dosis alfa hasil interaksi $^{10}\text{B}$ dengan neutron termal

$$\Phi = 1,13988 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_{\text{boron-10}} = 7,66714 \times 10^{-4} \text{ gram}$$

$$m_{\text{kanker}} = 38,3358 \text{ gram}$$

$$\sigma_B = 3,8637 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$$

$$N_{\text{Boron}} = \frac{\left(\frac{m}{Ar}\right)_{\text{Boron}} \times 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{m_{\text{kanker}}}$$

$$= \frac{\left(\frac{7,66714 \times 10^{-4}}{10}\right) \times 6,023 \times \frac{10^{23} \text{ atom}}{\text{mol}}}{38,3358 \times 10^{-3} \text{ kg}}$$

$$= 1,2046 \times 10^{21}$$

$$Q = 2,33 \text{ MeV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}$$

$$= 3,728 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\begin{aligned} \dot{D} &= \frac{N_{\text{Boron}} \Phi \sigma_B Q J}{1 \frac{\text{J/kg}}{\text{Gy}}} \\ &= \frac{1,204 \times 10^{21} \times 1,13988 \times 10^8 \times 3,8637 \times 10^{-21} \times 3,728 \times 10^{-13} \times 1,6 \times 10^{-13}}{1 \frac{\text{J/kg}}{\text{Gy}}} \end{aligned}$$

$$= 4,59896 \times 10^{-3} \text{ Gy/s}$$

### 4. Laju Dosis Nitrogen

$$\Phi = 1,13988 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_{\text{kanker}} = 38,3358 \text{ gram}$$

$$m_{\text{Nitrogen}} = 0,17250765 \text{ gram}$$



$$Ar N = 14 \text{ g/mol}$$

$$\sigma_N = 1.8269 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$N_{Nitrogen} = \frac{\left(\frac{0,17250765}{14}\right) \times 6.023 \times \frac{10^{23} \text{ atom}}{\text{mol}}}{38,3358 \times 10^{-3} \text{ kg}}$$

$$= 1,93593 \times 10^{23}$$

$$\dot{D} = \frac{N_{Nitrogen-tumor} \Phi \sigma_{Nitrogen} \times Q \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{1 \frac{\text{J/kg}}{\text{Gy}}}$$

$$= \frac{1,9359 \times 10^{23} \times 1,13988 \times 10^8 \times 2,33 \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{1 \frac{\text{J/kg}}{\text{Gy}}}$$

$$= 9,89931 \times 10^{-5} \text{ Gy/s}$$

#### 5. Laju dosis total

$$\dot{D}_{total} = (w_{Alfa} \times \dot{D}_{Alfa}) + (w_p \times \dot{D}_{proton}) + (w_n \times \dot{D}_{neutron}) + (w_\gamma \times \dot{D}_\gamma)$$

$$= (3,8 \times 4,5989 \times 10^3) + (3,2 \times 2,94524 \times 10^{-4}) + (3,2 \times 9,89931 \times 10^{-5}) + (1 \times 5,96207 \times 10^{-5})$$

$$= 1,87949 \times 10^{-2} \text{ Gy/s}$$

Perhitungan dosis untuk jaringan target lain menggunakan perhitungan yang sama hanya nilai parameter yang dihitung saja berbeda.