

**PEMODELAN KOLIMATOR UNTUK *BORON NEUTRON
CAPTURE THERAPY* DENGAN SUMBER *COMPACT
NEUTRON GENERATOR* MENGGUNAKAN *MONTE
CARLO N-PARTICLE* VERSI 5**

SKRIPSI

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
Mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh

Siti Halijah Laara
09620012

Kepada

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2014**



PENGESAHAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Nomor : UIN.02/D.ST/PP.01.1/3247/2014

Skripsi/Tugas Akhir dengan judul : *Pemodelan Kolimator Untuk Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Dengan Sumber Compact Neutron Generator (CNG) Menggunakan Monte Carlo N-Particle Versi 5(MCNP5)*

Yang dipersiapkan dan disusun oleh :
Nama : Siti Halijah Laara
NIM : 09620012
Telah dimunaqasyahkan pada : 24 Oktober 2014
Nilai Munaqasyah : A
Dan dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga

TIM MUNAQASYAH :

Ketua Sidang

Ir. Prof. Yohannes Sardjono
NIP.19590610 198103 1 002

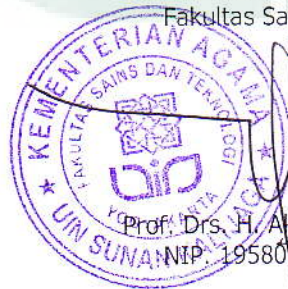
Penguji I

Dr. Suharyana, M.Sc.
NIP.196112171989031003

Penguji II

Asih Melati, S.Si.,M.Sc.
NIP. 198411102011012000

Yogyakarta, 03 November 2014
UIN Sunan Kalijaga
Fakultas Sains dan Teknologi
Dekan



Prof. Drs. H. Akh. Minhajji, M.A, Ph.D
NIP. 19580919 198603 1 002



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Surat Persetujuan Skripsi/Tugas Akhir
Lamp : Skripsi

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 : Siti Halijah Laara
NIM : 09620012
Judul Skripsi : *Pemodelan Kolimator Untuk Boron Neutron Capture Therapy Dengan Sumber Compact Neutron Generator Menggunakan Monte Carlo N-Particle Versi 5.*

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 Jurusan Fisika

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

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 5 Oktober 2014
Pembimbing I


Ir. Prof. Yohannes Sardjono
NIP.19590610 198103 1 002



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Surat Persetujuan Skripsi/Tugas Akhir
Lamp : Skripsi

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 : Siti Halijah Laara
NIM : 09620012
Judul Skripsi : *Pemodelan Kolimator Untuk Boron Neutron Capture Therapy Dengan Sumber Compact Neutron Generator Menggunakan Monte Carlo N-Particle Versi 5.*

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 Jurusan 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, 5 Oktober 2014
Pembimbing II

Dr. Suharyana, M. Sc
NIP.1911217198903 1 003

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini saya :

Nama : Siti Halijah Laara
NIM : 09620012
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Dengan ini saya menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa skripsi saya yang berjudul **“Pemodelan Kolimator Untuk *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) Dengan Sumber *Compact Neutron Generator* (CNG) Menggunakan *Monte Carlo N-Particle* Versi 5 (MCNP5)”** adalah asli hasil penelitian saya sendiri dan bukan plagiasi hasil karya orang lain dan tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 1 Oktober 2014

Yang menyatakan




Siti Halijah Laara
NIM. 09620012

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin,

Tak ada yang pantas dipuji selain yang Maha Sempurna, Allah SWT. Syukur kehadiran Allah SWT., yang selalu memberikan rahmat, hidayah, serta kekuatanNya yang tak terhingga kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk mencapai sarjana S-1 program studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Yogyakarta. Shalawat serta salam tercurahkan kepada teladan sepanjang zaman, Nabi Akhirul Zaman, Muhammad SAW, para keluarganya, sahabat serta pengikutnya yang setia yang kelak kita tunggu *syafa'atnya* hingga hari kiamat kelak. *Amin.*

Penulisan skripsi dengan judul “Pemodelan Kolimator Untuk *Boron Neutron Capture Therapy* Dengan Sumber *Compact Neutron Generator* Menggunakan *Monte Carlo N-Particle* Versi 5” ini untuk memberi gambaran sebuah model kolimator yang dapat diaplikasikan untuk sebuah terapi kanker. Penyelesaian penulisan skripsi ini tidak terlepas dari do'a serta dukungan dari pihak-pihak yang telah membantu penulis. Untuk itu, dari lubuk hati yang paling dalam penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang tak terhingga kepada :

1. Kedua Orang tuaku, *supporter* abadi, Bapakku tercinta Samsudin Laara dan Mamaku tersayang Fatimah, yang tidak pernah putus untuk mendo'akan penulis dalam setiap sujudnya, kakak-kakakku tersayang (Ida, Maulana, Sangaji, Nashrullah) dan si-bungsu Hardiyanti serta Yogi-Ziyad-Tsaqif-

Hilman yang selalu menyemangati dan memberi dukungan saat penulis *down feel*.

2. Bapak Prof. Dr. Musa Asyarie, selaku rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Bapak Prof. Drs. H. Akh. Minhaji, M.A.,Ph.D selaku dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Bapak Frida Agung Rakhmadi, M.Sc selaku Ketua Program Studi Fisika.
5. Bapak Ir. Prof. Yohannes Sardjono selaku pembimbing I dari PSTA-BATAN yang senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan perhatian, arahan, serta sabar dalam membimbing penulis hingga skripsi ini dapat terselesaikan.
6. Bapak Dr.Suharyana, M.Sc selaku pembimbing II yang selalu meluangkan waktu untuk memberikan perhatian, arahan, serta sabar dalam memberi bimbingan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
7. Ibu Nita Handayani M.Sc selaku dosen pembimbing di kampus yang selalu memberikan motivasi dan bimbingan tulus kepada penulis.
8. Bapak, ibu dosen program studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah mengajarkan dan membagikan ilmunya serta pegawai TU fisika (bu tutik) atas semua bantuannya.
9. Sahabatku tersayang “NAFAS” yang selalu menemani, memberi nasihat dan dukungannya. Aya Nandha yang selalu menjaga dan mengingatkan penulis untuk tetap istiqomah dalam setiap kesulitan.

10. Teman-teman seperjuangan angkatan 2009 Fisika UIN SUKA, terkhusus Indah, Destuth, Fenty, Astixa, Phyka, Rizma, Mashur, dan Dhea, yang selalu memberi dukungan dan meyakinkan penulis untuk segera lulus.
11. Teman2 wisma “UMMUL MIZAN” (Nhu2ng, K’ Phino, mb Dwi, Ryla) yang selalu setia menemani penulis saat berkadang untuk mengerjakan skripsi ini
12. Nang, opung, wia, ka’u dan tata anggota IKPMBJ, terimakasih atas semua bantuan selama penulis berada di kota rantau ini. Terutama kepada Nang-R, Nang-Taslim, Nang Avan, ad’ Isnain, ad’ Nuraini & Opung Fiber.☺
13. Rekan-rekan pejuang BNCT dari UIN-SUKA (Ikhlas dan Nurhidayah) dan UGM (mb nina, mb’ Dwi, mb’ anggra, dan mas Ilma) serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah membantu dalam penulisan skripsi ini sehingga dapat terselesaikan.

Akhirnya, Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan karya penulis selanjutnya. Karena kesempurnaan hanya miliki Yang Maha Sempurna, Allah SWT. Disisi lain, terbersit juga suatu harapan penulis agar skripsi ini dapat bermanfaat adanya dan semoga Allah memasukkannya sebagai amal jariyah untuk tabungan di hari akhir kelak. Amin☺.

Yogyakarta, Oktober 2014

Penulis,

PERSEMBAHAN

Motto Hidup:

“ jadilah orang yang kuat sepanjang perjalanan hidupmu, karena dengan menjadi kuat kamu bisa menyelamatkan orang-orang yang kamu cintai”

By : OP

“Bagaimanapun kamu, tetaplah jadi dirimu sendiri”

Pesan : Bapak

Kupersembahkan skripsi ini untuk :

- ♥ Rasa syukur kepada Allah SWT
- ♥ Bapak dan mama tersayang
- ♥ Ida, Maulana, Sangaji, hardiyanti, tata ziyad dan dd' tsaqif
- ♥ Semua keluarga dan sahabat di Baranusa
 - ♥ Teman-teman seperjuangan Fisika'09
 - ♥ Almamaterku tercinta, UIN-SUKA

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
PERSEMBAHAN	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
ABSTRAK	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Batasan Masalah	7
1.5 Manfaat Penelitian	8
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1. Tinjauan Pustaka.....	9
2.2. Dasar Teori.....	11
2.2.1 <i>Boron Neutron Capture Therapy</i> (BNCT).....	11
2.2.2 Komponen dosis pada BNCT	12
2.2.3 <i>Linear Energy Transfer</i> (LET).....	14
2.2.4 Boron (B)	15
2.2.5 Senyawa Boron	16
2.2.6 <i>Compact Neutron Generator</i> (CNG)	18
2.2.6.1 Sumber ion	20
2.2.6.2 Kolom akselerator	23
2.2.6.3 Elektroda target	23
2.2.6.4 Generator neutron tipe aksial	24

2.2.6.5	Generator neutron tipe co-Axcial.....	25
2.2.7	<i>Monte Carlo N-Particle</i> (MCNP)	25
2.2.8	<i>Monte Carlo N-Particle</i> versi 5 (MCNP5)	26
2.3.	Integrasi – Interkoneksi.....	27

BAB III METODE PENELITIAN

3.1.	Waktu dan tempat penelitian	30
3.2.	Alat dan bahan penelitian	30
3.3.	Prosedur pemodelan	30
3.3.1	Penginstalan <i>code</i> MCNP5	32
3.3.2	Membuat desain model kolimator	33
3.3.3	Membuat file input.....	36
3.3.4	Proses running.....	40
3.3.5	Analisis hasil <i>running</i>	41

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1.	Hasil.....	42
4.1.1.	Moderator.....	42
4.1.2.	Reflektor (dinding kolimator).....	43
4.1.3.	Filter	44
4.2.	Pembahasan	45
4.2.1.	Moderator.....	45
4.2.2.	Reflektor (dinding kolimator).....	47
4.2.3.	Filter	50
4.2.4.	Hasil pemodelan kolimator	52

BAB V PENUTUP

5.1.	Kesimpulan	55
5.2.	Saran	56

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Interaksi ^{10}B dan neutron	11
Gambar 2.2	Data isotop boron.....	16
Gambar 2.3	Komponen sederhana sumber neutron CNG	19
Gambar 2.4	Struktur internal CNG dengan sumber ion <i>penning dioda</i>	20
Gambar 2.5	Sumber ion multicup RF-driven	22
Gambar 2.6	Skema CNG tipe <i>co-Axial</i>	25
Gambar 2.7	Start-up konfigurasi MCNP Vised.....	27
Gambar 3.1	Diagram alir simulasi pemodelan kolimator.....	31
Gambar 3.2	Tutorial cara penginstalan MCNP5	33
Gambar 3.3	Komponen umum kolimator.....	34
Gambar 3.4	Proses <i>running</i> pada cmd.....	40
Gambar 3.5	<i>File output</i> hasil <i>running</i>	41
Gambar 4.1	Perubahan nilai fluks neutron terhadap variasi material moderator	45
Gambar 4.2	Perubahan nilai fluks neutron terhadap variasi ketebalan moderator	46
Gambar 4.3	Perubahan nilai fluks neutron terhadap variasi material reflektor	48
Gambar 4.4	Kurva tampang lintang material untuk reflektor	49
Gambar 4.5	Perubahan nilai fluks neutron terhadap variasi ketebalan reflektor.....	50
Gambar 4.6	Perubahan nilai fluks neutron terhadap variasi Material filter	50
Gambar 4.7	Perubahan nilai fluks neutron terhadap variasi ketebalan filter.....	52
Gambar 4.8	Kurva Model kolimator dengan reaksi D-D	52
Gambar 5.1	Perubahan reflector atau dinding kolimator pada belakang sumber.....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Energi partikel hasil reaksi $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	4
Tabel 1.2	Variasi Parameter berkas neutron yang rekomendasi IAEA.....	6
Tabel 2.1	Hasil penelitian fluks neutron dengan CNG reaksi D-T	10
Tabel 2.2	Tampang lintang reaksi komponen dosis BNCT	14
Tabel 2.3	LET berbagai jenis radiasi	15
Tabel 2.4	Berat atom dari komposisi atom penyusun BSH	17
Tabel 2.5	Komposisi ^{10}B dalam senyawa BSH	17
Tabel 2.6	Berat atom dari komposisi atom penyusun BPA	18
Tabel 2.7	Komposisi ^{10}B dalam senyawa BPA	18
Tabel 3.1	Parameter berkas	39
Tabel 3.2	Deskripsi tipe <i>tally</i> yang disediakan MCNP	39
Tabel 3.3	Deskripsi tipe <i>tally</i> yang digunakan	40
Tabel 3.4	Variasi material	41
Tabel 3.5	Variasi ketebalan	41
Tabel 4.1	Variasi material moderator	43
Tabel 4.2	Variasi ketebalan moderator	43
Tabel 4.3	Variasi material reflektor	43
Tabel 4.4	Variasi ketebalan reflektor	44
Tabel 4.5	Variasi material filter	44
Tabel 4.6	Variasi ketebalan filter	44
Tabel 4.7	Parameter berkas hasil simulasi	53

**PEMODELAN KOLIMATOR UNTUK *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY*
DENGAN SUMBER *COMPACT NEUTRON GENERATOR* MENGGUNAKAN *MONTE
CARLO N-PARTICLE* VERSI 5**

**Siti Halijah Laara
09620012**

ABSTRAK

BNCT merupakan terapi kanker yang memanfaatkan ^{10}B dan neutron termal. Keberhasilan terapi BNCT sangat bergantung pada ketepatan pengiriman neutron ke sel kanker. Untuk itu dibutuhkan suatu kolimator yang dapat mengarahkan neutron agar tepat pada sel kanker sehingga meminimalisir interaksi neutron dengan sel normal pasien. Berkas neutron yang digunakan dalam BNCT harus memenuhi lima syarat minimum yang direkomendasikan oleh IAEA. Untuk itu perlu dilakukan optimasi kolimator. Optimasi dilakukan dengan mensimulasikan komponen kolimator dengan *software* MCNP5. Sumber neutron yang digunakan dalam simulasi adalah CNG dengan energi 2.5 MeV (reaksi D-D). Simulasi optimasi dilakukan dengan memvariasikan jenis material penyusun kolimator dan ketebalan kolimator. Optimasi desain kolimator menghasilkan fluks neutron epitermal $2.08 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$, rasio dosis neutron cepat terhadap fluks epitermal $336 \times 10^{-13} \text{ Gy.cm}^2/\text{n}$, rasio dosis gamma terhadap fluks epitermal $16.4 \times 10^{-13} \text{ Gy.cm}^2/\text{n}$, rasio fluks termal per epitermal sebesar 1.43, dan rasio arus terhadap fluks epitermal sebesar 0.19. Berdasarkan hasil optimasi disimpulkan bahwa: pada penelitian ini belum dihasilkan parameter yang dapat memenuhi rekomendasi IAEA sebagai syarat berkas minimum dalam BNCT. Oleh karena itu, dapat dilakukan optimasi desain kolimator dalam penelitian selanjutnya.

Kata kunci : BNCT, Kolimator, MCNP5, CNG.

**PEMODELAN KOLIMATOR UNTUK *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY*
DENGAN SUMBER *COMPACT NEUTRON GENERATOR* MENGGUNAKAN *MONTE
CARLO N-PARTICLE* VERSI 5**

**Siti Halijah Laara
09620012**

ABSTRACT

BNCT is a cancer therapy that utilizes ^{10}B and neutrons thermal. The success of BNCT therapy is highly dependent on the accuracy of neutrons delivery to cancer cells. That requires a collimator of neutrons that can lead right to the cancer cells to minimize the interaction of neutrons with the patient's normal cells. The neutron beam that are used in BNCT has to fulfill five minimum requirements which was recommended by the IAEA. It is necessary for optimization of collimator. Optimization conducted by simulating the collimator components with software MCNP5. Source of neutrons used in the simulation is CNG with energy 2.5 MeV (DD reaction). Simulation of optimization is conducted by varying material type and thickness of the constituent collimator collimator. Collimator of design optimization produce the epithermal neutron flux $2.08 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$, fast of neutrons dose ratio of the epithermal flux $336 \times 10^{-13} \text{ Gy.cm}^2/\text{n}$, ratio of the flux of gamma dose the epithermal $16.4 \times 10^{-13} \text{ Gy.cm}^2/\text{n}$, ratio the thermal flux and the epithermal at 1.43, and ratio of current and the epithermal flux is 0.19. Based on the optimization results concluded that : in this research has not produced parameters that can fulfill the IAEA recommendations as a minimum requirement in the BNCT beam. Therefore, the collimator of design optimization can be done in future studies.

Keywords : BNCT, Collimator, MCNP5, CNG.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sel adalah struktur dan fungsi dasar dari semua makhluk hidup atau disebut sebagai *the building block of life*. Pada sel normal, pembelahan sel terjadi secara terkendali dimana sel-sel yang tidak berfungsi lagi akan mati dan diganti oleh sel baru, sedangkan pada sel kanker pembelahan sel terjadi secara tidak terkendali dimana sel-sel yang tidak berfungsi lagi tumbuh secara cepat dan menyebabkan sel normal lain menjadi tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Jika hal ini semakin tidak terkontrol maka akan mencapai tahap metastatis sehingga dapat mengakibatkan kematian. Hal ini kemudian dikenal sebagai kanker, yang didefinisikan sebagai sekelompok penyakit yang ditandai dengan pertumbuhan dan penyebaran sel-sel secara abnormal sehingga menyebar ke sel normal lainnya. Kanker disebabkan oleh dua faktor, yaitu faktor eksternal dan faktor internal (Rasouli, 2012; ACS, 2011).

Kanker merupakan penyakit yang menyebabkan kematian kedua (21%) di dunia setelah *cardiovascular* atau jantung (48%) (WHO, 2012). Namun, jika pengelompokan negara berdasarkan pada perkembangan ekonomi, maka kanker merupakan penyumbang utama kematian di negara-negara maju dan penyebab kedua di negara berkembang (setelah jantung). Bahkan menurut Organisasi

Kesehatan Dunia (WHO), kanker dapat menggantikan penyakit jantung sebagai penyebab utama kematian di dunia (ACS, 2011).

Data terbaru IARC menunjukkan bahwa selalu terjadi peningkatan signifikan pada kasus kanker dan jumlah kematian akibat kanker di dunia. Pada tahun 2008 terjadi 12,7 juta kasus dengan 7,6 juta kematian akibat kanker, dan meningkat menjadi 14,1 juta kasus baru dan 8,2 juta jiwa meninggal akibat kanker pada tahun 2012 dari jumlah populasi 7 milyar. Jumlah ini diprediksi akan meningkat menjadi 19,3 juta kasus kanker baru per tahun pada tahun 2025. Di tahun 2012, lebih dari setengah kasus kanker (56,8%) dari kematian akibat kanker (64,9%) terjadi pada daerah tertinggal di dunia dan akan terus meningkat pada tahun 2025 (IARC, 2012). Menurut data statistik IARC, tahun 2012 di Indonesia dari 244.769.000 populasi terdapat 299.700 jiwa kasus kanker dengan angka kematian yang terjadi akibat kanker sebesar 194.500 jiwa (IARC, globocan 2012).

Berdasarkan beberapa fakta di atas maka penanganan kanker harus dilakukan secara hati-hati karena memerlukan pilihan lebih dari satu intervensi. Ada beberapa macam pengobatan yang digunakan untuk menyembuhkan penyakit maupun hanya memperpanjang hidup serta meningkatkan kualitas hidup pasien. Secara umum pengobatan tersebut dibagi dalam 3 bagian yaitu pembedahan (operasi), radioterapi (terapi radiasi), dan kemoterapi (WHO, 2013).

Radioterapi merupakan pengobatan kanker yang menggunakan dosis radiasi tinggi untuk menghancurkan sel-sel kanker dan menyusutkan sel tumor. Sinar-X, sinar- γ , dan partikel bermuatan merupakan jenis radiasi yang digunakan untuk

pengobatan kanker. Radiasi tersebut digunakan dalam tingkat energi yang tinggi, sehingga baik sel-sel tumor maupun sel-sel sehat akan rusak karena partikel-partikel ini juga terionisasi dalam sel-sel sehat di sekitarnya. Jenis berkas ini ternyata kurang efektif karena memiliki karakteristik *Linear Energy Transfer* (LET) relatif rendah (sinar- γ , $LET = 3 \times 10^{-4} \text{ keV}/\mu\text{m}$; sinar-X 250 kV, $LET = 3 \times 10^{-4} \text{ keV}/\mu\text{m}$). Akibatnya, dalam beberapa kasus radioterapi konvensional gagal digunakan secara efektif (IAEA, 2001; Sauerwein, 2012; Alobity, 2012).

Salah satu metode baru yang sedang dikembangkan yaitu *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT). BNCT merupakan metode terapi kanker yang baru dikembangkan di Indonesia. Saat ini BNCT juga sedang dikembangkan di beberapa negara lain seperti Jepang, Finlandia, Taiwan, Argentina, Italia, dan USA. BNCT merupakan terapi kanker yang menggunakan ^{10}B dan neutron (termal dan epitermal). Neutron termal digunakan untuk mengobati kanker yang terletak di dekat permukaan jaringan, sedangkan neutron epitermal digunakan untuk mengobati tumor yang terletak lebih dalam dari permukaan jaringan. Partikel alfa dan inti ^7Li yang dihasilkan melalui reaksi $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ akan digunakan untuk membunuh sel-sel kanker. Partikel alfa dan inti ^7Li memiliki LET tinggi (tabel 1.1) dan rentang jangkauan pendek, yaitu 4,5-9 μm . Sementara ukuran sel manusia adalah 10 μm , sehingga kedua partikel ini dapat membunuh sel kanker dan mengurangi kerusakan pada sel sehat disekitarnya (Jacob, 2013; IAEA, 2001).

Tabel 1.1. Energi partikel hasil reaksi $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$

Partikel hasil	Kelimpahan 94%	Kelimpahan 6%
α	1,47 MeV	1,78 MeV
^7Li	0,84 MeV	1,01 MeV
γ	0,48 MeV	-

Sumber : IAEA, 2010

Dalam BNCT partikel yang berperan utama adalah neutron dan boron. Kedua partikel ini merupakan partikel yang tidak kasat mata. Dalam Al-Qur'an neutron dan boron disebutkan dengan istilah “*dzarrah*” yang diartikan sebagai butir yang sangat kecil atau biji sawi. Para ulama sepakat bahwa istilah “*dzarrah*” diartikan sebagai atom. Dalam beberapa surat kata “*dzarrah*” disebutkan dalam beberapa ayat, yaitu :

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْآنٍ 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 ﴿٦١﴾

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).” (QS. Yunus, 10:61).

Dari ayat diatas tersirat makna bahwa Al-Qur'an sejak 15 abad yang lalu telah mengisyaratkan tentang *dzarrah* atau atom yang berukuran kecil. Meskipun tidak secara langsung menyebutkan seberapa kecil ukuran atom tersebut. Dalam surat lain ditegaskan bahwa walaupun ukurannya kecil atom tetap memiliki ukuran. Sesuai dengan firman Allah dalam QS. Al-Qamar ayat 49 berikut :

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ ﴿٤٩﴾

Artinya :

“*Sesungguhnya kami menciptakan segala sesuatu menurut ukuran.*” (QS.Al-,54: 49)

Ayat diatas menjelaskan bahwa walaupun sangat kecil atom tetap memiliki ukuran yang akhirnya ditentukan oleh para ilmuwan sebesar 10^{-8} cm. Al-Qur'an telah mengisyaratkan tentang adanya ukuran semua benda ciptaan Allah tak terkecuali atom yang memiliki ukuran sangat kecil (Wardhana, 2004).

Neutron yang digunakan untuk BNCT berasal dari beberapa sumber neutron diantaranya reaksi fisi yang terjadi pada reaktor nuklir, sistem akselerator, neutron hasil reaksi fusi (D-D atau D-T) pada generator neutron, dan Californium-252 (^{252}Cf). Untuk simulasi dalam penelitian ini menggunakan sumber neutron dari *Compact Neutron Generator* (CNG) (IAEA, 2001). CNG merupakan sumber neutron dengan ukuran yang lebih sederhana sehingga menjadi alternatif yang cocok sebagai sumber neutron untuk perawatan BNCT pada instalasi rumah sakit. Sumber CNG memiliki tingkat keamanan tinggi, pengaturan dan perawatan lebih mudah, biaya instalasi lebih hemat, serta lebih mudah diterima oleh masyarakat

dibandingkan dengan reaktor nuklir. CNG juga memiliki energi monoenergetik yang dipancarkan dari reaksi DD atau DT dengan masing-masing energi sebesar 2,5 MeV dan 14,1 MeV (Rasouli, 2012).

Neutron yang dipancarkan melalui sumber apapun merupakan neutron dengan energi cepat sehingga dibutuhkan moderasi untuk menghasilkan berkas neutron yang memenuhi syarat dalam BNCT. Syarat neutron yang digunakan untuk BNCT mengikuti rekomendasi IAEA (*International Atomic Energy Agency*) seperti ditunjukkan dalam tabel 1.2 (IAEA, 2001).

Tabel 1.2. Parameter berkas neutron yang rekomendasi IAEA

Parameter	Keterangan	Nilai
Φ_{epi} (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epitermal	$> 1,0 \times 10^9$
$\dot{D}_f / \Phi_{\text{epi}}$ (Gy.cm ² .n ⁻¹)	Dosis neutron cepat per fluks epitermal	$< 2,0 \times 10^{-13}$
$\dot{D}_\gamma / \Phi_{\text{epi}}$ (Gy.cm ² .n ⁻¹)	Dosis gamma per fluks epitermal	$< 2,0 \times 10^{-13}$
$\Phi_{\text{th}} / \Phi_{\text{epi}}$	Rasio fluks termal dan fluks epitermal	$< 0,05$
J / Φ_{epi}	Rasio arus neutron and fluks epitermal	$> 0,7$

Sumber : IAEA, 2001.

Untuk memenuhi persyaratan tersebut maka dilakukan optimasi desain kolimator yang meliputi geometri dan material kolimator agar dapat menghasilkan output neutron dengan syarat tersebut. Perhitungan optimasi desain dilakukan dengan paket komputer *Monte Carlo N-Particle* versi 5 (MCNP5) yang digunakan untuk menghitung interaksi antara partikel neutron dan neutron maupun jenis-jenis partikel lainnya.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Material apa yang baik dalam menghasilkan output berkas yang sesuai dengan kriteria yang direkomendasikan oleh IAEA?
2. Berapa diameter geometri kolimator yang dapat menghasilkan output berkas yang sesuai dengan kriteria yang direkomendasikan oleh IAEA?
3. Bagaimana model kolimator yang dapat menghasilkan output berkas neutron yang sesuai dengan kriteria yang direkomendasikan oleh IAEA?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui material yang dapat menghasilkan keluaran output berkas yang sesuai dengan kriteria yang direkomendasikan oleh IAEA.
2. Mengetahui diameter geometri kolimator yang dapat menghasilkan output berkas yang sesuai dengan kriteria yang direkomendasikan oleh IAEA.
3. Mengetahui model kolimator yang dapat menghasilkan output berkas neutron yang sesuai dengan kriteria yang direkomendasikan oleh IAEA.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Sumber neutron yang digunakan adalah *Compact Neutron Generator* (CNG) reaksi D-D energi 2,5 MeV dengan model dalam simulasi berbentuk sumber titik.

2. Rekomendasi output berkas IAEA menjadi rujukan utama dalam melakukan simulasi.
3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software *Monte Carlo N-Particle* versi 5 (MCNP5).

1.5. Manfaat Penelitian

1. Menghasilkan model kolimator dengan sumber *Compact Neutron Generator* dengan output berkas neutron yang memenuhi rekomendasi IAEA.
2. Menambah informasi mengenai model kolimator dan sebagai referensi untuk aktivitas penelitian lebih lanjut dalam pemodelan kolimator untuk menghasilkan berkas neutron epitermal dalam aplikasi BNCT.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil penelitian dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

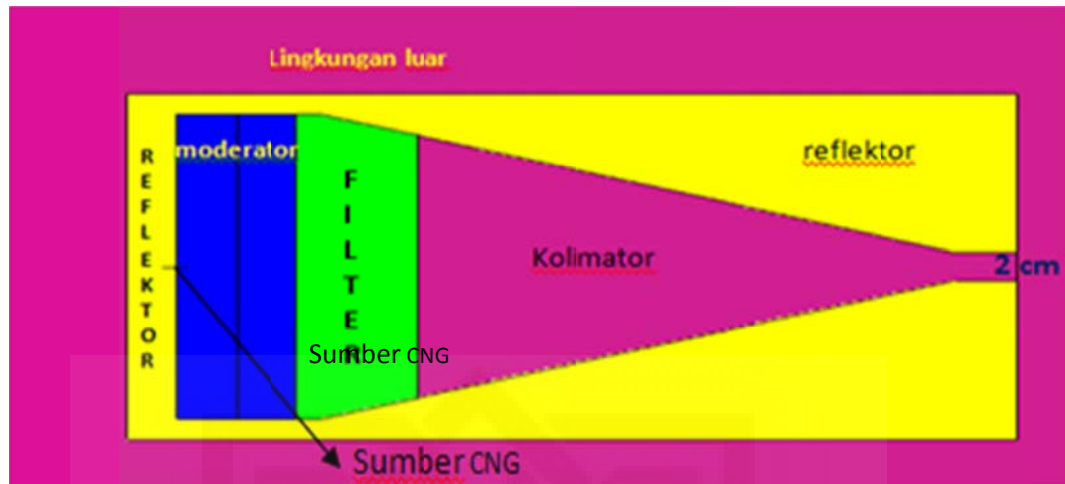
1. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dengan menguji material rekomendasi sebagai material moderator (^{27}Al , ^{12}C , ^{32}S , Al_2O_3 , AlF_3 , Parafin ($\text{C}_{25}\text{H}_{52}$)), reflektor (Pb , PbF_2 , dan ^{12}C), dan filter (^{56}Fe , LiF , B_4C , ^{32}S , Cd-Nat , ^9Be , dan ^{27}Al) diperoleh material yang efektif dalam menghasilkan output berkas mendekati rekomendasi IAEA dengan menggunakan paraffin ($\text{C}_{25}\text{H}_{52}$) sebagai moderator, reflektor dengan material ^{12}C , dan ^{27}Al sebagai material filter.
2. Untuk mendapat berkas neutron yang sesuai rekomendasi IAEA maka simulasi dilakukan dengan memvariasikan ketebalan dari setiap komponen kolimator untuk memperoleh tebal maksimum yang baik dalam menghasilkan output parameter berkas neutron. Ketebalan moderator divariasi pada 2.5 cm hingga 15 cm dengan interval 2.5 cm, ketebalan filter divariasi dengan tebal 1 cm hingga 5 cm dengan interval 1cm, ketebalan reflektor divariasi dengan tebal 0.5 cm hingga 3 cm dengan interval 0.5 cm. Dari variasi ketebalan yang dilakukan diperoleh fluks neutron tertinggi pada tebal moderator 5 cm, tebal filter 5 cm, dan reflektor dengan ketebalan 3 cm.
3. Dari hasil akhir simulasi diperoleh model kolimator dengan sumber berbentuk titik, paraffin ($\text{C}_{25}\text{H}_{52}$) sebagai moderator dengan tebal 5 cm, reflektor dengan material ^{12}C dengan tebal 3 cm, dan ^{27}Al sebagai material filter dengan ketebalan 5 cm. Parameter

neutron dengan model kolimator ini masih belum memenuhi parameter yang menjadi kriteria IAEA.

5.2. Saran

Pada pemodelan kolimator dengan sumber CNG reaksi D-D menggunakan program komputasi MCNP5 ini masih belum mendapatkan hasil yang sesuai kriteria IAEA sehingga penulis memberi saran untuk penelitian lebih lanjut dapat melakukan :

1. Mendesain kolimator dengan menggunakan metode *shifting*, yaitu menggunakan moderator untuk menurunkan energi neutron cepat yang dihasil dari sumber CNG reaksi D-D yang memiliki kuat sumber kecil.
2. Mengkombinasikan material-material moderator, filter dan reflektor yang lainnya. Misalnya dengan menggabungkan material yang memiliki tampang lintang serap terhadap neutron cepat dan termal tinggi seperti ^{56}Fe atau ^{27}Al sebagai filter neutron cepat dengan Cd-Nat sebagai filter neutron termal dengan ketebalan tertentu (metode *Filtering*).
3. Menggunakan bentuk sumber selain sumber titik sebagai bentuk sumber inputan dalam simulasi.
4. Untuk mendapatkan parameter fluks yang sesuai rekomendasi IAEA, simulasi desain kolimator selanjutnya dapat dilakukan dengan menaikkan kuat arus sumber pada CNG.
5. Membuat reflektor atau dinding kolimator pada semua bagian kolimator (belakang sumber) sehingga neutron yang menyebar pada arah berlawanan arah kolimator tetap dapat direfleksikan kedalam kolimator seperti pada gambar berikut.



Gambar 5.1. Reflektor atau dinding kolimator pada belakang sumber

6. Melakukan variasi terhadap diameter *uperture* sesuai diameter kanker sehingga dapat diperoleh parameter yang sesuai IAEA.

DAFTAR PUSTAKA

- ACS (American Cancer Society). 2011. *Global Cancer Facts & Figures 2nd Edition*. Atlanta: American Cancer Society. In producing GLOBOCAN 2008 IARC, <http://globocan.iarc.fr>.
- Alotiby, Mohammed. 2012. *Boron Neutron Capture Therapy for Cancer Treatments*. University of Surrey.
- Frederick Hawthorne. Condensed Version of the 79th Faculty Research Lecture Presented by Professor M.
- Hardik, P.H.Darji, Rajnikant Makwana, Mitul Abhangi, Sudhirsinh Vala, Dr.C. V.S. Rao. 2012. *14 MeV Neutron Generator – Literature Review*. International Journal of Scientific Engineering and Technology (ISSN : 2277-1581) www.ijset.com, Volume No.1, Issue No.3, pg:16-20 01 July 2012.
- IAEA. 2001. *Current Status Of Neutron Capture Therapy*. Austria.
- IAEA. 2010. *Radiation Biology: A Handbook for Teachers and Students*. VIENNA : Austria.
- IAEA. 2012. *Neutron Generators for Analytical Purposes*. VNIIA: Austria.
- Ilma, muhammad. 2013. *Perancangan Kolimator di Beam Port Tembus Reaktor Kartini untuk Boron Neutron Capture Therapy*. Universitas Gadjah Mada: yogyakarta
- IARC (*International Agency for Cancer Research*), WHO. 2013. Latest world cancer statistics Global cancer burden rises to 14.1 million new cases in 2012: Marked increase in breast cancers must be addressed. PRESS RELEASE N° 223. Akses di <http://globocan.iarc.fr/> tanggal 8 desember 2013
- Jacob, G. Fantidis, Bandekas V Dimitrios, Potolias Constantinos and Vordos Nick. 2013. *Fast and Thermal Neutron Radiographies Based on a Compact Neutron Generator*. Journal of Theoretical and Applied Physics. <http://www.jtaphys.com/content/6/1/20>

- Jerome Maurice Verbeke. 2000. *Development of High-Intensity D-D and D-T Neutron Sources and Neutron Filters for Medical and Industrial Applications (dissertation)*. University of California, Berkeley.
- Koivunoro, Hanna. 2012. *Dosimetry and Dose Planning in Boron Neutron Capture Therapy: Monte Carlo Studies*. University of Helsinki: Finland.
- Kortesniemi, Mika. 2002. *Solutions for Clinical Implementation of Boron Neutron Capture Therapy in Finland*. University of Helsinki. Finland.
- Li Deng, Chaobin Chen, Tao Ye and Gang Li. 2011. *The Dosimetry Calculation for Boron Neutron Capture Therapy*. Beijing Capture Tech Co., Ltd. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics China.
- Nina Fauziah, Andang Widi Harto, Yohannes Sardjono,. 2013. *A Conceptual Design Of Neutron Collimator In The Thermal Column Of Kartini Research Reactor For Boron Neutron Capture Therapy*. (Skripsi), Department of Physics Engineering FT UGM and PTAPB-BATAN YK.
- Rasouli, Fatemeh, Seyed F. Masoudi. 2012. *Simulation of the BNCT of Brain Tumors Using MCNP Code: Beam Designing and Dose Evaluation*. Iranian Journal of Medical Physics Vol. 9, No. 3, Summer 2012, 183-192. *Physics Department, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran*.
- Sauerwein, Wolfgang A. G., Andrea Wittig, Raymond Moss, Yoshinobu Nakagawa, Editors. 2012. *Neutron Capture Therapy Principles and Applications*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London.
- Seppala, Tiina. 2002. *FIR 1 Epithermal Neutron Beam Model and Dose Calculation for Treatment Planning in Neutron Capture Therapy*. University of Helsinki.
- World Health Organization - *NCD Country Profiles, INDONESIA*. 2011. <http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/2010/globocan2008.php> akses pada 8 desember 2013.
- Wardhana, wisnu. 2004. *Al-Qur'an dan Energi Nuklir*. Pustaka pelajar: Yogyakarta
- World Health Organization (WHO). 2012. *World Health Statistics*. France.

World Health Organization (WHO), 2013 Cancer
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs297/en/> akses minggu 19

januari 2014.

World Health Organization (WHO), 2013, Treatment of Cancer,
<http://www.who.int/cancer/treatment/en/> akses minggu 19 jan 14.

X-5 Monte Carlo Team. 2003. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. Volume 1: Overview and Theory. LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos:New Mexico.

X-5 Monte Carlo Team. 2003. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. Volume II: User's Guide. LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos:New Mexico.

Lampiran I

c Created on: Sunday, February 02, 2014 at 14:18

.....*File Input MCNP5*.....

.....*Siti Halijah Laara*.....

..... *cell card*.....

1 5 -0.001205 -1 15 -3 -4:-6 -4 15 imp:n=1 imp:p=1 \$Kolimator
 2 11 -2.26 1 -5 2 -4:-1 6 2 3 -4 imp:n=1 imp:p=1 \$reflektor
 3 5 -0.001205 -7 8 -9 10 -11 12 (5:-2:4) imp:n=1 imp:p=1
 4 0 7:-8:9:-10:11:-12 imp:n=0 imp:p=0 \$moderator
 5 8 -0.952 -1 2 -13 -3 imp:n=1 imp:p=1
 6 8 -0.952 -1 13 -14 -3 imp:n=1 imp:p=1
 7 13 -2.07 -1 14 -15 -3 imp:n=1 imp:p=1 \$Filter

.....*surface card*.....

1 cx 22
 2 px 0
 3 kx 35 0.57549396 -1
 4 px 35
 5 cx 22.5
 6 cx 2
 7 px 100
 8 px -90
 9 py 90
 10 py -90
 11 pz 90
 12 pz -90
 13 px 2.5
 14 px 5
 15 px 10
 mode n p

..... *material card*.....

c m1 13027 -1 \$Al
 c m2 13027 -0.529 8016 0.471 \$Al2O3
 c m3 83209 -1 \$Bi-9.75
 c m4 26056 -1 \$Fe-7.674
 m5 7014 -0.778 7015 -0.003 8016 -0.209 18000 -0.016 \$Udara-0.001205
 c m6 3006 -0.27 9019 -0.73 \$LiF-2.64
 c m7 82207 -0.845 9019 -0.155 \$PbF2-8.445
 m8 6012 -0.8514 1001 -0.1486 \$Parafin-0.952
 c m9 13027 -0.321 9019 -0.679 \$AlF3
 c m10 82207 -1 \$Pb-11.35
 m11 6000 -1 \$C-2.26
 c m12 5010 -0.145 5011 -0.638 6000 -0.217 \$B4C-2.52
 m13 16032 -1 \$S32-2.07

c m14 48000 -1 \$cd--8.65
 c m15 5010 -0.078 5011 -0.313 -6012 -0.109 13027 -0.500\$Boral
 c m16 4009 -1 \$Be-1.65
 c m17 3007 -1 \$Li-0.53

.....*data card*.....

sdef POS=1 0 0 ERG=2.5 PAR=1 \$posisi sumber CNG

.....*tally card*.....

f1:n 2 4 \$arus neutron

fm1 7.89598e8

f4:n 1 \$fluks neutron

fm4 1.2e12

e4 5e-7 1e-2 2.5

f14:n 1 \$dosis neutron

fm14 1.2e12

e14 5e-7 0.01 2.5

de14 3.6E-7 6.3E-7 1.1E-6 2E-6 3.6E-6

6.3E-6 1.1E-5 2E-5 3.6E-5 6.3E-5

1.1E-4 2E-4 3.6E-4 6.3E-4 1.1E-3

2E-3 3.6E-3 6.3E-3 0.011 0.02

0.036 0.063 0.082 0.086 0.09

0.094 0.098 0.105 0.110 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

df14 5.06E-14 3.84e-14 2.91e-14 2.17e-14 1.64e-14

1.28e-14 1.03e-14 8.92e-15 8.87e-15 1.05e-14

1.45e-14 2.33e-14 3.97e-14 6.78E-14 1.17e-13

2.1e-13 3.73e-13 6.42e-13 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-8

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

f24:p 1 \$dosis foton
fm24 1.2E12
de24 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
df24 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
nps 1000000



LAMPIRAN II

Tabel 1. Variasi material dan ketebalan moderator

M : Al-27							
Tebal	φ_{th} (n/cm ² .s)	φ_{epi} (n/cm ² .s)	φ_{fast} (n/cm ² .s)	J/ φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)	D_γ / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)
2.5	3.22E+05	1.08E+07	7.53E+08	4.36E+00	2.98E-02	6.36E-09	2.45E-11
5	6.15E+05	1.65E+07	6.87E+08	2.84E+00	3.74E-02	4.55E-09	2.03E-11
7.5	2.92E+05	1.36E+07	5.46E+08	3.31E+00	2.15E-02	5.03E-09	2.21E-11
10	6.49E+05	1.71E+07	4.67E+08	1.82E+00	3.80E-02	3.45E-09	1.48E-11
12.5	3.38E+05	1.23E+07	3.34E+08	1.78E+00	2.75E-02	3.50E-09	1.51E-11
15	5.15E+05	1.60E+07	3.23E+08	1.29E+00	3.23E-02	2.68E-09	1.03E-11
M : Parafin (C25H52)							
Tebal	φ_{th} (n/cm ² .s)	φ_{epi} (n/cm ² .s)	φ_{fast} (n/cm ² .s)	J/ φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)	D_γ / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)
2.5	8.80E+07	1.48E+08	6.94E+08	3.40E-01	5.96E-01	5.82E-10	2.29E-13
5	2.97E+08	1.83E+08	4.41E+08	2.53E-01	1.62E+00	3.59E-10	1.37E-12
7.5	2.47E+08	9.77E+07	2.03E+08	2.66E-01	2.53E+00	3.63E-10	4.01E-12
10	2.40E+08	6.55E+07	1.20E+08	2.86E-01	3.66E+00	3.18E-10	8.45E-12
12.5	1.27E+08	2.92E+07	5.31E+07	3.15E-01	4.36E+00	3.01E-10	1.71E-11
15	9.73E+07	1.81E+07	3.07E+07	3.26E-01	5.39E+00	2.75E-10	2.85E-11
M : Al2O3							
Tebal	φ_{th} (n/cm ² .s)	φ_{epi} (n/cm ² .s)	φ_{fast} (n/cm ² .s)	J/ φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)	D_γ / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)
2.5	5.60E+05	1.50E+07	7.85E+08	3.34E+00	3.73E-02	4.05E-09	1.25E-11
5	1.22E+06	3.02E+07	7.28E+08	1.65E+00	4.04E-02	2.45E-09	7.16E-12
7.5	1.12E+06	2.67E+07	5.12E+08	1.30E+00	4.18E-02	2.28E-09	5.97E-12
10	2.00E+06	4.72E+07	4.98E+08	6.92E-01	4.23E-02	1.63E-09	2.93E-12
12.5	1.31E+06	3.91E+07	3.48E+08	5.76E-01	3.35E-02	1.53E-09	2.40E-12
15	2.35E+06	6.17E+07	3.29E+08	3.33E-01	3.81E-02	9.78E-10	1.24E-12
M : AlF3							
Tebal	φ_{th} (n/cm ² .s)	φ_{epi} (n/cm ² .s)	φ_{fast} (n/cm ² .s)	J/ φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)	D_γ / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)
2.5	8.30E+05	2.33E+07	8.17E+08	2.29E+00	3.56E-02	3.21E-09	2.11E-11
5	2.43E+06	6.26E+07	7.33E+08	7.88E-01	3.88E-02	1.60E-09	8.75E-12
7.5	2.17E+06	7.08E+07	4.87E+08	4.46E-01	3.06E-02	1.05E-09	5.31E-12
10	4.34E+06	1.25E+08	4.33E+08	2.25E-01	3.46E-02	5.51E-10	2.42E-12
12.5	3.13E+06	1.14E+08	2.74E+08	1.60E-01	2.76E-02	3.50E-10	1.62E-12
15	5.61E+06	1.55E+08	2.27E+08	1.04E-01	3.63E-02	2.07E-10	8.89E-13

M : C-12							
Tebal	φ_{th} ($n/cm^2.s$)	φ_{epi} ($n/cm^2.s$)	φ_{fast} ($n/cm^2.s$)	J/ϕ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)	D_y / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)
2.5	1.91E+04	2.88E+06	7.07E+08	1.93E+01	6.64E-03	1.14E-08	1.70E-14
5	1.78E+06	3.32E+07	7.02E+08	1.43E+00	5.37E-02	1.81E-09	3.14E-15
7.5	1.34E+05	1.36E+07	4.39E+08	2.77E+00	9.79E-03	3.08E-09	3.30E-15
10	9.87E+05	3.50E+07	4.11E+08	9.81E-01	2.82E-02	1.52E-09	1.45E-15
12.5	1.85E+06	3.93E+07	2.82E+08	6.13E-01	4.70E-02	1.10E-09	1.69E-15
15	5.60E+06	6.39E+07	2.53E+08	3.36E-01	8.76E-02	7.02E-10	2.47E-15
M : S-32							
Tebal	φ_{th} ($n/cm^2.s$)	φ_{epi} ($n/cm^2.s$)	φ_{fast} ($n/cm^2.s$)	J/ϕ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)	D_y / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)
2.5	1.42E+04	1.45E+06	6.50E+08	3.36E+01	9.79E-03	2.57E-08	4.33E-11
5	6.47E+03	1.91E+06	5.66E+08	2.51E+01	3.39E-03	2.51E-08	3.89E-11
7.5	3.77E+03	1.56E+06	3.90E+08	2.25E+01	2.41E-03	2.64E-08	3.77E-11
10	6.82E+03	1.85E+06	3.59E+08	1.78E+01	3.68E-03	2.15E-08	2.97E-11
12.5	3.66E+03	1.31E+06	2.57E+08	1.86E+01	2.80E-03	2.38E-08	3.11E-11
15	2.11E+04	1.57E+06	2.37E+08	1.46E+01	1.34E-02	1.83E-08	2.29E-11

Tabel 2. Variasi material dan ketebalan filter

M : Fe-56							
Tebal	φ_{th} ($n/cm^2.s$)	φ_{epi} ($n/cm^2.s$)	φ_{fast} ($n/cm^2.s$)	J/ϕ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)	D_y / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)
1	1.76E+08	1.63E+08	4.20E+08	2.38E-01	1.08E+00	3.99E-10	3.24E-12
2	1.05E+08	1.52E+08	4.08E+08	2.22E-01	6.89E-01	4.50E-10	3.90E-12
3	6.66E+07	1.47E+08	3.96E+08	2.07E-01	4.54E-01	4.66E-10	3.91E-12
4	4.40E+07	1.41E+08	3.85E+08	1.97E-01	3.12E-01	4.73E-10	3.69E-12
5	3.12E+07	1.39E+08	3.76E+08	1.84E-01	2.23E-01	5.07E-10	3.25E-12
M : LiF							
Tebal	φ_{th} ($n/cm^2.s$)	φ_{epi} ($n/cm^2.s$)	φ_{fast} ($n/cm^2.s$)	J/ϕ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)	D_y / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)
1	1.55E+06	7.46E+07	3.84E+08	3.76E-01	2.07E-02	7.52E-10	2.70E-12
2	1.06E+06	5.34E+07	3.42E+08	4.47E-01	1.98E-02	9.40E-10	3.83E-12
3	8.25E+05	4.18E+07	3.04E+08	4.92E-01	1.98E-02	9.95E-10	4.84E-12
4	6.83E+05	3.46E+07	2.72E+08	5.11E-01	1.97E-02	1.08E-09	5.72E-12
5	5.87E+05	2.99E+07	2.43E+08	5.14E-01	1.96E-02	1.07E-09	6.38E-12
M : B4C							
Tebal	φ_{th} ($n/cm^2.s$)	φ_{epi} ($n/cm^2.s$)	φ_{fast} ($n/cm^2.s$)	J/ϕ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)	D_y / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)

1	1.26E+06	6.45E+07	3.91E+08	4.34E-01	1.96E-02	9.16E-10	5.89E-12
2	7.55E+05	4.41E+07	3.53E+08	5.45E-01	1.71E-02	1.30E-09	8.10E-12
3	6.31E+05	3.41E+07	3.19E+08	6.17E-01	1.85E-02	1.53E-09	9.80E-12
4	5.41E+05	2.92E+07	2.91E+08	6.38E-01	1.85E-02	1.72E-09	1.07E-11
5	5.68E+05	2.65E+07	2.65E+08	6.15E-01	2.15E-02	1.71E-09	1.11E-11
M : S-32							
Tebal	φ_{th} (n/cm ² .s)	φ_{epi} (n/cm ² .s)	φ_{fast} (n/cm ² .s)	J/ φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)	D_γ / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)
1	2.89E+08	1.86E+08	4.36E+08	2.42E-01	1.55E+00	3.56E-10	1.53E-12
2	2.82E+08	1.89E+08	4.33E+08	2.32E-01	1.49E+00	3.47E-10	1.67E-12
3	2.76E+08	1.91E+08	4.30E+08	2.23E-01	1.45E+00	3.40E-10	1.78E-12
4	2.69E+08	1.92E+08	4.26E+08	2.15E-01	1.40E+00	3.36E-10	1.87E-12
5	2.63E+08	1.94E+08	4.22E+08	2.07E-01	1.35E+00	3.35E-10	1.94E-12
M : cd-Nat							
Tebal	φ_{th} (n/cm ² .s)	φ_{epi} (n/cm ² .s)	φ_{fast} (n/cm ² .s)	J/ φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)	D_γ / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)
1	8.36E+06	1.61E+08	4.23E+08	2.06E-01	5.19E-02	4.62E-10	8.69E-13
2	7.39E+06	1.52E+08	4.11E+08	2.02E-01	4.86E-02	5.24E-10	6.65E-13
3	7.11E+06	1.44E+08	3.99E+08	1.98E-01	4.93E-02	5.59E-10	5.13E-13
4	6.79E+06	1.38E+08	3.90E+08	1.92E-01	4.91E-02	6.40E-10	3.87E-13
5	6.44E+06	1.31E+08	3.79E+08	1.90E-01	4.92E-02	6.83E-10	3.02E-13
M : Be-9							
Tebal	φ_{th} (n/cm ² .s)	φ_{epi} (n/cm ² .s)	φ_{fast} (n/cm ² .s)	J/ φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)	D_γ / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)
1	3.27E+08	1.77E+08	4.03E+08	2.43E-01	1.84E+00	3.59E-10	1.50E-12
2	3.53E+08	1.76E+08	3.75E+08	2.32E-01	2.01E+00	3.52E-10	1.58E-12
3	3.74E+08	1.77E+08	3.50E+08	2.19E-01	2.11E+00	3.31E-10	1.59E-12
4	3.90E+08	1.80E+08	3.27E+08	2.07E-01	2.17E+00	3.03E-10	1.53E-12
5	4.05E+08	1.83E+08	3.06E+08	1.94E-01	2.21E+00	2.97E-10	1.50E-12
M : Al-27							
Tebal	φ_{th} (n/cm ² .s)	φ_{epi} (n/cm ² .s)	φ_{fast} (n/cm ² .s)	J/ φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)	D_γ / φ_{epi} (Gy.cm ² /n)
1	2.99E+08	1.89E+08	4.28E+08	2.35E-01	1.58E+00	3.50E-10	1.45E-12
2	3.02E+08	1.95E+08	4.20E+08	2.20E-01	1.55E+00	3.45E-10	1.53E-12
3	3.03E+08	2.00E+08	4.13E+08	2.07E-01	1.51E+00	3.47E-10	1.58E-12
4	3.01E+08	2.05E+08	4.06E+08	1.96E-01	1.47E+00	3.38E-10	1.61E-12
5	2.98E+08	2.08E+08	3.99E+08	1.87E-01	1.43E+00	3.36E-10	1.64E-12

Tabel 4.3. Variasi material dan ketebalan reflektor

M : C							
Tebal	φ_{th} ($n/cm^2.s$)	φ_{epi} ($n/cm^2.s$)	φ_{fast} ($n/cm^2.s$)	J/φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)	D_γ / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)
0.5	2.97E+08	1.83E+08	4.41E+08	2.53E-01	1.62E+00	3.59E-10	1.37E-12
1	3.13E+08	1.89E+08	4.46E+08	2.55E-01	1.65E+00	3.55E-10	1.36E-12
1.5	3.27E+08	1.94E+08	4.50E+08	2.58E-01	1.68E+00	3.49E-10	1.35E-12
2	3.40E+08	1.99E+08	4.53E+08	2.61E-01	1.71E+00	3.44E-10	1.35E-12
2.5	3.53E+08	2.03E+08	4.56E+08	2.65E-01	1.74E+00	3.42E-10	1.34E-12
3	3.64E+08	2.07E+08	4.58E+08	2.69E-01	1.76E+00	3.41E-10	1.34E-12
M : Pb							
Tebal	φ_{th} ($n/cm^2.s$)	φ_{epi} ($n/cm^2.s$)	φ_{fast} ($n/cm^2.s$)	J/φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)	D_γ / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)
0.5	1.78E+08	1.40E+08	4.13E+07	2.69E-01	1.26E+00	4.05E-10	1.91E-12
1	1.82E+08	1.44E+08	4.18E+08	3.43E-01	1.27E+00	4.05E-10	1.90E-12
1.5	1.86E+08	1.47E+08	4.22E+08	3.47E-01	1.27E+00	4.03E-10	1.89E-12
2	1.89E+08	1.49E+08	4.26E+08	3.51E-01	1.27E+00	4.01E-10	1.87E-12
2.5	1.92E+08	1.52E+08	4.29E+08	3.56E-01	1.27E+00	3.99E-10	1.86E-12
3	1.95E+08	1.54E+08	4.32E+08	3.60E-01	1.27E+00	3.96E-10	1.86E-12
M : PbF ₂							
Tebal	φ_{th} ($n/cm^2.s$)	φ_{epi} ($n/cm^2.s$)	φ_{fast} ($n/cm^2.s$)	J/φ_{epi}	$\varphi_{th} / \varphi_{epi}$	D_f / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)	D_γ / φ_{epi} ($Gy.cm^2/n$)
0.5	2.01E+08	1.57E+08	4.53E+08	2.84E-01	1.28E+00	4.12E-10	1.84E-12
1	2.08E+08	1.62E+08	4.58E+08	2.86E-01	1.28E+00	4.06E-10	1.82E-12
1.5	2.14E+08	1.66E+08	4.63E+08	2.89E-01	1.29E+00	4.00E-10	1.80E-12
2	2.19E+08	1.70E+08	4.67E+08	2.91E-01	1.28E+00	3.95E-10	1.79E-12
2.5	2.24E+08	1.74E+08	4.71E+08	2.93E-01	1.28E+00	3.90E-10	1.77E-12
3	2.28E+08	1.77E+08	4.75E+08	2.95E-01	1.28E+00	3.86E-10	1.76E-12