

**ANALISIS VARIASI MATERIAL PERISAI RADIASI UNTUK
FASILITAS BNCT (*BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY*)
MENGUNAKAN SIMULASI MCNP-6**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

Program Studi Fisika



Diajukan oleh :

Miqdad Zaki Haidar

18106020040

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA YOGYAKARTA

2025

HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1885/Un.02/DST/PP.00.9/08/2025

Tugas Akhir dengan judul : ANALISIS VARIASI MATERIAL PERISAI RADIASI UNTUK FASILITAS BNCT
(BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY) MENGGUNAKAN SIMULASI MCNP-6

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : MIQDAD ZAKI HAIDAR
Nomor Induk Mahasiswa : 18106020040
Telah diujikan pada : Rabu, 20 Agustus 2025
Nilai ujian Tugas Akhir : A-

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
SIGNED

Valid ID: 68a79a91e87c0



Penguji I

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

Valid ID: 68a72a963b38f



Penguji II

Andi, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 68a776134c30



Yogyakarta, 20 Agustus 2025
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 68a7d129ab815

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Miqdad Zaki Haidar
NIM : 18106020040
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "Analisis Variasi Material Perisai Radiasi Untuk Fasilitas BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*) Menggunakan Simulasi MCNP-6" merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 13 Agustus 2025

Penulis



Miqdad Zaki Haidar

18106020040

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

CS Dipindai dengan CamScanner

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi
Lamp : -

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

Assalamu'alaikum wr. wb.

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

Nama : Miqdad Zaki Haidar
NIM : 18106020040
Judul Skripsi : Analisis Variasi Material Perisai Radiasi Untuk Fasilitas BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*) Menggunakan Simulasi MCNP-6

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

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

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 13 Agustus 2025
Pembimbing

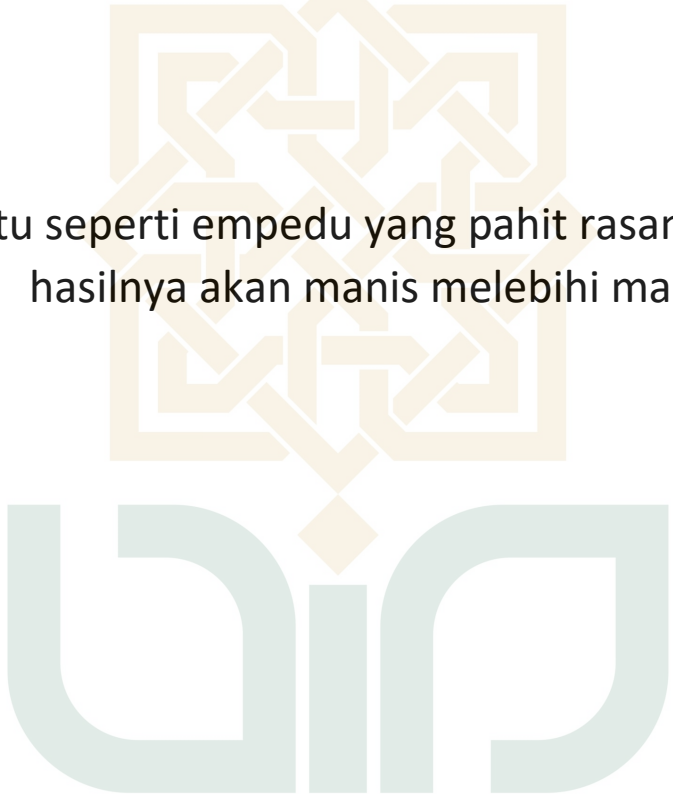
Dr. Nita Handayani, M.Si.
NIP. 19820126 200801 2 008

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

MOTTO

الصبر كالصبر مر في ماذا قتته لكن عوا كبه اهل من العسل

Sabar itu seperti empedu yang pahit rasanya, namun hasilnya akan manis melebihi madu



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PERSEMBAHAN

Ibunda dan Ayahanda Tercinta sebagai tanda bakti, hormat, dan rasa terima kasih yang tiada terhingga kupersembahkan karya kecil ini kepada Ibu dan Ayah yang telah memberikan kasih sayang, segala dukungan, dan cinta kasih yang tiada terhingga yang tiada mungkin dapat kubalas hanya dengan selebar kertas yang bertuliskan kata cinta dalam kata persembahan. Semoga ini menjadi langkah awal untuk membuat Ibu dan Ayah mau memaafkan keegoisanku selama ini.

Ibu Nita yang baik hati ... Izinkanlah aku mengantarkan ucapan terima kasih, untukmu sebagai dosen pembimbing yang telah bersedia mengantarkanku untuk mengantungi gelar sarjana. Maafkanlah tingkah-polahku yang merepotkan dan menjengkelkan semasa waktu studiku.

Skripsi ini juga ku persembahkan untuk keluarga besarku, kakek-nenek, paman-bibi, dan karim-kerabat untuk segala dukungan yang sudah diberikan selama waktu studi ku.



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kepada Allah SWT yang senantiasa mencurahkan rahmat, karunia, kesempatan, dan kelancaran-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Variasi Material Perisai Radiasi Untuk Fasilitas BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*) Menggunakan Simulasi MCNP6”. Tugas Akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang teramat dalam atas bimbingan, arahan, masukan, dan saran yang telah diberikan selama penyusunan laporan kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu mendukung proses penulis untuk meraih gelar S-1, termasuk dalam pelaksanaan penelitian hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Dr. Widayanti M.Si, selaku Ketua Program Studi Fisika.
3. Dr. Nita Handayani M.Si, selaku Dosen Pembimbing 1, dengan bimbingan arahan, motivasi, dan kebaikan hati beliau yang amat luas kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Fajar Arianto M.Si, selaku Dosen Pembimbing 2, dengan bimbingan, arahan, motivasi, dan bantuan beliau kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.

5. Seluruh Dosen dan Jajaran Staf Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama masa studi penulis.
6. Program Studi Fisika Universitas Diponegoro yang menerima penulis selama masa penelitian Tugas Akhir sehingga dapat terlaksana dengan lancar.
7. Teman-teman Fisika angkatan 2018 yang telah kebersamai, membantu dan memotivasi penulis dalam perkuliahan dan penyusunan Tugas Akhir.
8. Teman-teman anggota “IKAPMAWI Yogyakarta” yang telah kebersamai penulis selama masa studi dan penelitian.
9. Mas Faiz Choirunnajah, dan Bung Reyhan Sapta Anggara yang telah banyak membantu pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sampaikan satu per satu yang telah bersumbangsih sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis memohon maaf sebesar mungkin dan dengan senang hati menerima kritik, saran, dan masukan yang bersifat membangun untuk perbaikan dan kemajuan penulis di masa mendatang. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis, pembaca dan pihak lainnya.

Yogyakarta, 18 Agustus 2025

Penulis

Analisis Variasi Material Perisai Radiasi Untuk Fasilitas BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*) Menggunakan Simulasi MCNP6

Miqdad Zaki Haidar
18106020040

INTISARI

Telah dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui nilai *flux* dan laju dosis radiasi setelah melewati beberapa variasi material perisai radiasi, serta mengetahui material perisai radiasi yang paling efektif. Hal ini penting untuk keselamatan pekerja radiasi di fasilitas BNCT. Penelitian ini menggunakan simulator MCNP6 (*Monte Carlo N-Particle 6*) untuk memodelkan sumber neutron BNCT dan perisai radiasi. Desain perisai radiasi harus mampu menahan radiasi hingga batas laju dosis maksimal sebesar 10 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ dengan asumsi nilai tersebut merupakan batasan yang paling konservatif, yakni dengan lama waktu pekerja 2000 jam dalam satu tahun. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah parafin, beton, dan BPE (*Borated Polyethylene*). Hasil yang diperoleh dari simulasi adalah nilai *flux* radiasi dari material beton sebesar $4.98242\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di kiri, $8.49752\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di depan, dan $6.11110\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di kanan, sedangkan nilai laju dosisnya sebesar 8974 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di kiri, 15300 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di depan, dan 11010 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di kanan. Nilai *flux* dari material BPE sebesar $2.27417\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di kiri, $7.02884\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di depan, dan $2.26976\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di kanan, sedangkan nilai laju dosisnya sebesar 4090 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di kiri, 12642 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di depan, dan 4084 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di kanan. Nilai dari material parafin sebesar $5.17328\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di kiri, $6.66068\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di depan, dan $5.25806\text{E}+4$ partikel/ $\text{cm}^2.\text{s}$ di kanan, sedangkan nilai laju dosisnya 9320 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di kiri, 11996 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di kdepn, dan 9472 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ di kanan. Berdasarkan data yang diperoleh, material BPE memiliki efektfitas yang lebih baik dibanding material lainnya karena memiliki nilai laju dosis yang lebih kecil dengan laju dosis rata-rata sebesar 8684 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$, sedangkan beton dan parafin memiliki rata-rata laju dosis sebesar 11761 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ dan 10262 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$.

Kata kunci: perisai radiasi, parafin, BPE, BNCT, MCNP

***Analysis of Radiation Shielding Materials Variation for BNCT (Boron Neutron
Capture Therapy) Facility Using MCNP6 Simulation***

**Miqdad Zaki Haidar
18106020040**

ABSTRACT

A research has been done with aims to measure the flux and radiation dose rate over some shielding materials, also to analyze the most effective shielding material. This research is important for radiation workers safety in BNCT facility. The research used MCNP6 (Monte Carlo N-Particle 6) simulator to model the BNCT neutron source and the shielding. The shielding should reduce radiation to less than the dose limit of 10 $\mu\text{Sv}/\text{hour}$, which is assumed to be the most conservative limit, i.e. while duration of workers is 2000 hours. Materials used in this research is paraffin, concrete, and BPE (Borated Polyethylene). The research shows the flux value of concrete material $4.98242\text{E}+4$ particle/cm².s left side, $8.49752\text{E}+4$ particle/cm².s front side, and $6.11110\text{E}+4$ partikcle/cm².s right side, with dose rate value of 8974 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$ left side, 15300 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$ front side, and 11010 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$ right side. Flux value BPE $2.27417\text{E}+4$ particle/cm².s left side, $7.02884\text{E}+4$ particle/cm².s front side, and $2.26976\text{E}+4$ particle/cm².s right side, with dose rate value of 4090 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$ left side, 12642 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ front side, and 4084 $\mu\text{Sv}/\text{Jam}$ right side. Flux value of parafin $5.1732806\text{E}+4$ particle/cm².s left side, $6.66068\text{E}+4$ particle/cm².s front side, and $5.25806\text{E}+4$ particle/cm².s right side, with dose rate value of 9320 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$ left side, 11996 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$ front side, and 9472 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$ right side. Based from data acquired, BPE have better effectivity than the other materials because it has lower dose rate value averaging at 8684 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$, meanwhile concrete and paraffin averaging at 11761 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$ and 10262 $\mu\text{Sv}/\text{Hour}$.

Key words: shielding, paraffin, BPE, BNCT, MCNP

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI.....	iii
MOTTO	v
PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	i
INTISARI	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian.....	7
1.4. Batasan Penelitian	7
1.5. Manfaat Penelitian.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1. Studi Pustaka	9
2.2. Landasan Teori.....	14
2.2.1. Konsep Dasar Fisika Radiasi.....	14
2.2.2. Radioterapi	16
2.2.3. Interaksi Neutron dengan Materi.....	17
2.2.4. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT).....	21
2.2.3. Proteksi Radiasi.....	28

2.2.4.	Dosimetri Radiasi.....	32
2.2.5.	Material Perisai Radiasi	34
2.2.6.	Program MCNP	36
2.2.7.	Pandangan Islam Mengenai Pemanfaatan Teknologi Nuklir	38
BAB III METODE PENELITIAN		41
3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian.....	41
3.2.	Alat dan Bahan Penelitian	41
3.2.1.	Alat Penelitian.....	41
3.2.2.	Bahan Penelitian.....	42
3.3.	Tahapan Penelitian	44
3.3.1.	<i>Input</i> Parameter	45
3.3.2.	<i>Input</i> Source	46
3.3.3.	<i>Input</i> Geometri	46
3.3.4.	Simulasi Variasi Material.....	48
3.3.5.	<i>Tally</i>	48
3.3.6.	Running MCNP6.....	49
3.3.7.	Output Desain dan <i>Flux</i>	49
3.3.8.	Visualisasi Desain	49
3.3.9.	Konversi Nilai <i>Flux</i> ke Laju Dosis.....	50
3.4.	Metode Analisa Data	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		52
4.1.	Perhitungan Nilai <i>Flux</i>	53
4.2.	Perhitungan Nilai Laju Dosis	55
4.3.	Analisis Efektivitas	56
4.4.	Integrasi-Interkoneksi.....	57
BAB V KESIMPULAN		59
5.1.	Kesimpulan.....	59

5.2. Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	61
LAMPIRAN.....	64



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Ilustrasi SSB dan DSB pada DNA.....	16
Gambar 2.2. Hamburan Elastis.....	18
Gambar 2.3. Hamburan Inelastis	19
Gambar 2.4. Tangkapan Radiatif.....	19
Gambar 2.5. Lontaran Partikel atau Spalasi	20
Gambar 2.6. Reaksi Fisi	20
Gambar 2.7. Prinsip Dasar BNCT	21
Gambar 2.8. Interaksi Boron dan Sel Kanker.....	23
Gambar 2.9. <i>Flux</i> Radiasi.....	33
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	44
Gambar 4.1. Pemodelan Perisai Radiasi Tampak Depan	52
Gambar 4.2. Pemodelan Perisai Radiasi Tampak Bawah	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Studi Pustaka	13
Tabel 3.1 Waktu Penelitian	41
Tabel 3.2 Alat Penelitian	41
Tabel 3.3 Data Material.....	42
Tabel 3.4 Nilai keluaran kolimator Warfi dkk (2015).....	47
Tabel 3.5 <i>Tally</i>	48
Tabel 4.1 Nilai <i>Flux</i>	54
Tabel 4.2 Nilai Laju Dosis	55



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kanker adalah penyakit yang diakibatkan terjadinya abnormalitas pertumbuhan tak terkendali dari suatu sel di tubuh sehingga merusak sel dan jaringan disekitarnya (Saravana, 2023). Kanker juga dapat didefinisikan sebagai gangguan dari perubahan genetik atau epigenetik dalam sel somatik (Copur, 2019). Gangguan ini berupa pertumbuhan abnormal yang nantinya akan menyebar ke bagian tubuh lainnya kemudian membentuk subset neoplasma. Sel abnormal yang disebut neoplasma atau tumor ini akan membentuk massa berupa benjolan yang menjalar ke seluruh bagian tubuh (Copur, 2019).

Sel kanker bersifat ganas dan kerusakannya mudah menyebar sehingga dapat menyebabkan kematian. Kanker dikategorikan sebagai penyakit kompleks akibat pertumbuhan dan penyebarannya yang tak terkendali hingga menimbulkan pembentukan tumor kemudian mengalami metastasis. Kanker dapat menyerang seluruh bagian tubuh dan menjangkit semua usia, namun resiko munculnya sel kanker meningkat seiring pertambahan usia (Saravana, 2023).

Berdasarkan data GLOBOCAN (*Global Cancer Observatory*) pada tahun 2020, jumlah kasus kanker di dunia mencapai 19,3 juta kasus dengan kematian sebesar 10 juta kasus. Mortalitas yang termasuk tinggi dalam kasus kanker menyebabkan perlunya penanganan khusus, baik berupa pengobatan maupun terapi. Beberapa metode yang digunakan untuk menangani kanker antara lain pembedahan, kemoterapi, imunoterapi, terapi target, terapi hormon (endokrin), transplantasi sel

induk, serta terapi radiasi. Dari beberapa metode yang telah disebutkan, terdapat tiga metode yang menjadi rujukan utama dalam menangani kanker, yaitu pembedahan, kemoterapi, dan terapi radiasi (radioterapi) (Richter dkk, 2022).

Radioterapi merupakan metode non-bedah utama dalam pengobatan kuratif kanker (Chino dkk, 2020). Seperti namanya, metode ini menggunakan radiasi gelombang radio untuk mengobati kanker. Sebagai salah satu metode rujukan, radioterapi memiliki sejarah yang panjang dengan kualitas yang dapat bersaing dan biaya yang relative lebih rendah dibanding metode lain. Salah satu aplikasi radioterapi adalah *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT).

BNCT merupakan gabungan antara kemoterapi dan radioterapi yang menggunakan nuklida nonradioaktif Boron-10 untuk menangkap neutron termal dan epitermal yang menghasilkan reaksi nuklir cepat $^{10}\text{B} (n,\alpha) ^7\text{Li}$ (Sauerwien, 2012). Pengembangan BNCT amat masif, terutama di negara-negara seperti Jepang, Amerika Serikat, dan Jerman. Keunggulan terapi ini terdapat pada efektifitasnya, reaksi yang selektif hanya pada area kanker, menggunakan energi yang rendah, lama terapi yang singkat (20-60 menit) per sesi, serta senyawa yang digunakan tidak bersifat *toxic* (Holden dkk, 2005; Moss dkk).

Pengoperasian BNCT memerlukan sumber neutron. Terdapat dua tipe penghasil neutron yang biasa digunakan, yaitu reaktor dan akselerator. dari kedua sumber tersebut, reaktor merupakan yang paling umum digunakan. Indonesia memiliki tiga reaktor, yaitu reaktor TRIGA 2000 di Bandung, reaktor TRIGA MARK-II (Kartini Reaktor) di Yogyakarta, serta reaktor multiguna GA Siwabessy di Serpong. Dari

ketiganya, reaktor Kartini yang dapat digunakan untuk fasilitas BNCT (Priambodo dkk, 2018).

Satu hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan BNCT adalah dampak dari radiasi yang berkepanjangan, terutama untuk para pekerja radiasi yang mengoperasikannya. Radiasi yang berlebih, terutama untuk radiasi berbasis neutron dapat membahayakan kesehatan manusia. Hal ini disebabkan oleh tingginya *Linear Energy Transfer* (LET) yang dimiliki oleh neutron (Tepper dkk, 2021). Pembatasan dosis juga penting karena radiasi nuklir memiliki efek stokastik dan deterministik (Choudhary, 2018). Efek stokastik merupakan efek samping radiasi yang bersifat probabilistik. Efek ini timbul apabila seseorang terpapar radiasi dalam jangka waktu yang lama (tahunan). Efek ini dapat menyebabkan mutasi genetik pada penerima radiasi yang bisa mengakibatkan kanker atau cacat bayi dalam kandungan. Sedangkan efek deterministik merupakan efek samping paparan radiasi dalam jangka waktu pendek. Efek ini dapat mengakibatkan kerusakan pada jaringan tubuh dengan contoh parah adalah *erythema*, katarak, hingga penurunan kadar darah (Choudhary, 2018).

Fakta diatas membuat perlu adanya pembatasan dosis yang diterima oleh pekerja radiasi untuk mencegah efek samping akibat paparan radiasi yang berlebih. Berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir) Nomor 4 Tahun 2013 menyebutkan bahwa nilai batas dosis efektif rata-rata pekerja radiasi, termasuk kulit sebesar 20 mSv pertahun dalam periode lima tahun, sehingga dosis yang terakumulasi selama lima tahun tidak boleh melebihi 100 mSv, dan dalam satu tahun tertentu tidak boleh melebihi 50 mSv (BAPETEN, 2013).

Upaya yang dapat dilakukan untuk meminimalisir radiasi dari fasilitas BNCT adalah menerapkan perangkat proteksi radiasi. Salah satu teknik proteksi radiasi tersebut adalah pemasangan perisai radiasi di sekeliling ruang radiasi. Perisai ini dibuat menggunakan bahan yang mampu meredam radiasi agar tidak terjadi kebocoran. Beberapa bahan yang dapat digunakan untuk perisai adalah parafin, timbal, dan aluminium (Tsurayya dkk, 2020).

Penentuan desain perisai yang efektif dan efisien memerlukan simulasi untuk memberikan gambaran kinerja perisai yang akan dibangun. *Monte Carlo N-Particle* (MCNP) merupakan pemrograman yang lazim digunakan untuk melakukan simulasi terhadap radiasi. MCNP adalah suatu *computer code* yang memiliki kemampuan untuk melakukan simulasi probabilitas neutron, foton, dan elektron secara stokastik mulai dari pertama diproduksi hingga hilang, termasuk saat mengalami serapan, reaksi fisi, dan hamburan saat berinteraksi dengan materi (Xoubi, 2016). Terdapat beberapa seri MCNP yang sudah dikembangkan. Seri terbarunya adalah seri MCNP6, yang berisi pembaruan dari seri-seri sebelumnya.

Jauh sebelum fenomena nuklir dan ilmu mengenai atom ditemukan, Al-Quran sudah menjelaskan bahwa ada partikel super kecil yang menjadi penyusun alam semesta. Hal ini termaktub dalam surat Yunus ayat 61 :

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْآنٍ وَلَا تَعْمَلُونَ مِنْ عَمَلٍ إِلَّا كُنَّا

عَلَيْكُمْ شُهَدَاءَ 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

“Dan tidaklah kamu 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 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: 61).

Ayat ini menyebutkan adanya partikel dasar yang menjadi penyusun semua materi, baik di langit maupun di bumi, dengan sebutan zarrah. Hal ini sejalan dengan temuan para ahli, dimana terdapat atom-atom yang menjadi penyusun materi.

Tindakan untuk mencegah bahaya akibat radiasi juga sejalan dengan perintah Allah SWT dalam surat Al-Baqarah ayat 195 yang berbunyi :

وَأَنْفِقُوا فِي سَبِيلِ اللَّهِ وَلَا تُلْقُوا بِأَيْدِيكُمْ إِلَى التَّهْلُكَةِ وَأَحْسِنُوا إِنَّ اللَّهَ يُحِبُّ
الْمُحْسِنِينَ

“Dan belanjakanlah (harta bendamu) di jalan Allah, dan janganlah kamu menjatuhkan dirimu sendiri ke dalam kebinasaan, dan berbuat baiklah, karena sesungguhnya Allah menyukai orang-orang yang berbuat baik” (QS Al-Baqarah : 195).

Firman Allah SWT tersebut mengajak kita untuk mencegah kebinasaan, termasuk yang terjadi akibat penggunaan radiasi nuklir. Dengan adanya proteksi radiasi berupa perisai radiasi, lingkungan sekitar dapat terhindar dari paparan radiasi berlebih yang dapat menimbulkan mutasi dan pencemaran lingkungan yang berbahaya. Hal ini menggambarkan betapa kompleksnya ajaran islam dalam memperhatikan kebaikan umat manusia, serta menggambarkan keagungan Al-Qur'an yang merupakan kalam ilahi.

Penelitian mengenai perisai radiasi sudah banyak dibahas, diantaranya adalah penelitian milik Lutfin dkk, Sardjono dkk, Hana dkk, Garcia-Fernandez dkk, dan Shao dkk. Penelitian Sardjono dkk (2022) berfokus pada analisa kemampuan perisai radiasi dari parafin untuk fasilitas BNCT menggunakan simulasi PHITS.

Penelitian Lutfin dkk (2020) berfokus pada pemodelan perisai berbahan parafin dengan tambahan timbal sebagai casing untuk fasilitas BNCT menggunakan MCNPX. Penelitian Tsurayya dkk (2020) berfokus pada mengukur laju dosis radiasi pada perisai radiasi yang terbuat dari parafin dan aluminium untuk fasilitas BNCT menggunakan MCNPX. Penelitian Garcia-Fernandez dkk (2021) berfokus pada validasi beberapa material perisai radiasi untuk *Compact Proton Therapy Center* (CPTC) menggunakan MCNP6. Penelitian Fitrotun dkk (2023) berfokus pada analisis beberapa material perisai radiasi untuk terapi proton menggunakan PHITS.

Dari beberapa penelitian di atas, penulis mendapati penelitian untuk perisai radiasi BNCT dengan sumber reaktor Kartini terlalu berfokus pada material parafin. Oleh karena itu, penulis memutuskan untuk melakukan analisis variasi beberapa material perisai radiasi untuk BNCT dengan sumber reaktor Kartini berbasis MCNP6. Penelitian yang telah dilakukan ini menganalisis nilai *flux* dan laju dosis radiasi. Adapun material yang akan dianalisis adalah parafin, *borated polyethylene*, dan beton.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Berapa nilai *flux* radiasi neutron pada setiap variasi material perisai untuk fasilitas BNCT?
2. Berapa nilai laju dosis ekuivalen radiasi pada setiap variasi material perisai radiasi untuk fasilitas BNCT?

3. Bahan apakah yang paling efisien untuk perisai radiasi agar memenuhi syarat peraturan kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Mengukur nilai *flux* radiasi neutron pada setiap variasi material perisai radiasi untuk fasilitas BNCT.
2. Mengukur nilai laju dosis radiasi pada setiap variasi material perisai radiasi untuk fasilitas BNCT.
3. Menentukan material perisai radiasi yang paling efisien untuk menekan laju dosis radiasi sesuai dengan peraturan kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013.

1.4. Batasan Penelitian

Penelitian ini menggunakan batasan masalah dan asumsi sebagai berikut :

1. Kriteria batasan dosis mengacu pada peraturan kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013.
2. Model reaktor Kartini diasumsikan sebagai sumber neutron
3. Ukuran model ruangan sebesar sesuai dengan modul fasilitas BNCT reaktor Kartini
4. Software yang digunakan dalam proses simulasi adalah *Monte Carlo N-Particle* versi 6.2.
5. Energi yang dipakai bersifat konstan dan bernilai 2.5 MeV

1.5. Manfaat Penelitian

Berikut manfaat dari penelitian:

1. Menambah wawasan keilmuan mengenai pemodelan perisai radiasi berbasis MCNP-6.
2. Menambah pengetahuan mengenai perisai radiasi untuk fasilitas BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*).
3. Sebagai bahan referensi untuk penelitian lain mengenai perisai radiasi untuk fasilitas BNCT berbasis reaktor Kartini

BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai *flux* yang didapatkan dari simulasi ketiga material material beton sebesar $4.98242\text{E}+4$ partikel/cm².s di kiri, $8.49752\text{E}+4$ partikel/cm².s di depan, dan $6.11110\text{E}+4$ partikel/cm².s di kanan. Nilai *flux* dari material BPE sebesar $2.27417\text{E}+4$ partikel/cm².s di kiri, $7.02884\text{E}+4$ partikel/cm².s di depan, dan $2.26976\text{E}+4$ partikel/cm².s di kanan, sedangkan Nilai dari material parafin sebesar $5.17328\text{E}+4$ partikel/cm².s di kiri, $6.66068\text{E}+4$ partikel/cm².s di depan, dan $5.25806\text{E}+4$ partikel/cm².s di kanan, nhasil tersebut masih tinggi sehingga perlu optimasi perisai lebih lanjut.
2. Nilai laju dosis dari hasil perhitungan didapatkan nilai laju dosis beton sebesar $8974\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di kiri, $15300\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di depan, dan $11010\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di kanan. Nilai laju dosis BPE sebesar $4090\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di kiri, $12642\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di depan, dan $4084\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di kanan. Nilai laju dosisnya $9320\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di kiri, $11996\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di kdepan, dan $9472\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$ di kanan. Nilai ini masih melebihi dosis maksimum yang ditentukan oleh Perka BAPETEN, yaitu $10\text{ }\mu\text{Sv/Jam}$.
3. Material yang paling efektif menurut penelitian ini adalah BPE karena memiliki performa yang lebih baik dibanding material lainnya. hal ini karena BPE memiliki fraksi atom yang tinggi, lebih tinggi dari material lainnya sehingga mampu meredam radiasi neutron dengan baik.

5.2. Saran

Penelitian selanjutnya agar mempertimbangkan penggunaan lebih banyak variabel untuk disimulasikan, bisa berupa ketebalan material atau besar energi. Penelitian juga dapat dikembangkan dengan menggunakan material lain dan divalidasi secara eksperimental. Penelitian selanjutnya juga bisa menguji kekuatan struktur desain perisai radiasi, melakukan optimasi berupa penambahan material peredam radiasi tambahan, ataupun penambahan jumlah partikel.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, F. Mkhaiber., & Salwah K. Dawood. 2019. Calculation of Shielding Parameter of Fast Neutrons for Some Composite Material. *Al-Mustansiriyah Journal of Science*, **Vol. 30 No. 1**: 210-215
- Ardana, I M., A. D. Noerwasana, dan Y. Sardjono. 2018. Kajian Teknologi Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) dan Aspek Regulasinya. *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir*. ISSN: 1412-3258 : 95-101
- BAPETEN. 2013. *Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*. Perka BAPETEN No.3, Yogyakarta.
- Becker, Julian. 2007. *Simulation of Neutron Production at a Medical Linear Accelerator*. (Thesis Diploma). Universitat Hamburg: Institute of Experimental Physics.
- Boyd, M.A. 2009. The Confusing World of Radiation Dosimetry. *WM2009 Conference, March 1-5, Phoenix, AZ*.
- Copur, M.S. 2019. State of Cancer Research Around The Globe. *Oncology (Williston Park)*, **Vol. 33 No. 5, May** : 181-185
- Ervin, Podgorsak. 2005. *Radiation Oncology Physics: a Handbook for Teachers and Students*. Austria: International Atomic Energy Agency.
- Fitriatuzzakiyyah, N., Sinuraya, K. Rano, I. M. Puspitasari. 2017. Cancer Therapy With Radiation: The Basic Concept of Radiotherapy and Its Development in Indonesia. *Indonesian Journal of Clinical Pharmacy*, **Vol. 6 No. 4, Desember** : 311-320. <https://doi.org/10.15416/ijcp.2017.6.4.311>.
- Fitrotun, A., A.R. Azhar, Yasmin, Md. Radzi, I. Kambali. 2023. Combined Method of Bulk Material Shielding Evaluation for 200 MeV High Energy Neutron Source Using PHITS Modelling and Partial Density. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, **Vol. 8 No. 1, April** : 1-16. <https://doi.org/10.21009/spektra.081.01>.
- Garcia-Fernandez, G. F., E. Gallego, J. M. Hector, R. Gomez-Ros, Vega-Carrillo, R. Garcia-Baonza, L. E. Cevallos-Robalino, K. A. Guzman-Garcia. 2021. Neutron Dosimetry and Shielding Verification in Commissioning of Compact Proton Therapy Centers (CPTC) Using MCNP6.2 Monte Carlo Code. *Applied Radiation and Isotopes*, **Vol. 189, November**. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110432>.
- GLOBOCAN. 2020. *Estimated Number of Cancer Incidence, Mortality, and Prevalence Worldwide in 2020*. International Agency of Research for Cancer.
- Goorley, T., M. James, T. Booth, dkk. (2013). Features of MCNP6. *Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 201*, **October** : 27-31.

- Herman, Chember., & T. Johnson. 2008 *Introduction to Health Physics* (4th. Ed) New York: McGraw-Hill Medical.
- Hirose, K., A. Konno, J. Hiratsuka, dkk. 2021. Boron Neutron Capture Therapy Using Cyclotron-Based Epithermal Neutron Source and Borofalan (^{10}B) For Recurrent or Locally Advanced Head and Neck Cancer (JHN002): An Open-Label Phase II Trial. *Radiother Oncol.* **Feb**;155:182-187. doi: 10.1016/j.radonc.2020.11.001. PMID: 33186684.
- Joel, Tepper., Robert F., Jeff M. 2021. *Clinical Radiation Oncology* (5th ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Junzo, Chino., Christina A., Sushil B., Lisa B., Beth E., Emma F., Kathryn J. F., Matthew H., Christine H., Mitchell K., Eric L., Lilie L., Jyoti M., Marc M., Chika N., Daniel P., Akila V., 2020. Radiation Therapy for Cervical Cancer: Executive Summary of an ASTRO Clinical Practice Guideline. *Practical Radiation Oncology*, **Vol. 10 No. 4**: 220-234
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2018. *Dirjen Pelayanan Kesehatan: Radiasi pada Kanker Payudara*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Lutfin, H. A, Sukmaji, dan Widarto. 2020. Modelling of Paraffin Shielding for BNCT Facility at Kartini Reactor Research using MCNPX. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*, **Volume 5, Number 2, June**, hal. 31-37.
- Mayarani, Eka P. S. H., Nursama H. A., Robert K., & Muhammad I., 2018. Analysis of Rooftop Skyshine Radiation Exposure With Angle of Gantry Linear Accelerator 180° in Radiotherapy Unit of Pertamina Central Hospital Jakarta. *SANTAS: Jurnal Teknologi dan Seni Kesehatan*. **Vol.9 No.1**: 24-34
- Muslih, A., M. Ilma, Y. Sardjono, dan A. Widiarto. 2014. Perancangan Kolimator Di Beam Port Tembus Reaktor Kartini untuk Boron Neutron Capture Therapy. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*. ISSN 0216 – 3128 **10-14 Juni** : 163-178.
- Noreman, Coleman., Jeffrey B., Pataje P., Jacek C., Ceferino O., Michael E., Mansoor A., Julie H., Bhadrassain V. 2021. Moving Forward in the Next Decade: Radiation Oncology Sciences for Patient-Centered Cancer Care. *JNCI Cancer Spectrum*, **Vol. 5 No. 4** Mei: 1-10
- Nurhayati, & Neng N. Mulyaningsih. 2020. Penerapan Radioterapi pada Pengobatan Kanker Payudara. *Schrodinger Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pendidikan Fisika*. **Vol. 1 No. 2**: 88-94.
- Pelowitz, Denise B. 2008. *MCNPXTM User's Manual*. United States Department of Energy. Heidelberg Jerman. JRC77319.

- Priambodo, G., F. Nugroho, D. S. Palupi, R. Zailani, dan Y. Sardjono. 2018. Optimization Of Biological Shield For Boron Neutron Capture Cancer Therapy (BNCT) At Kartini Research Reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir* **Volume 19, No. 3 Oktober**, hal. 139-14
- Richter, L. E., Carlos A., Beber D. M. 2022. *Handbook of Radiotherapy Physics* (Second Edition). Unsited States: CRC Press
- Saravana, S. Kousik. 2023 *Fundamentals of Cancer Biology*. India : Abhayam Publishers
- Sardjono, Y., R. Walhikmah, R. Widiatmono, R. S. N. Mahmudah, G. S. Wijaya, I. M. Triatmoko, Widarto. 2022. Safety Analysis of Paraffin Wax Based Biological Shielding For Cancer Therapy With BNCT Method On Piercing beamport of Kartini nuclear reactor Yogyakarta. *Journal of Physics: Conference Series*, **Volume 2190, 6th International Conference on Advanced Materials for Better Future (6th ICAMBF)**
- Sauerwein, W.A.G., P. M. Bet, dan A. Wittig. 2012. Drugs for BNCT: BSH and BPA. *Jurnal Neutron Capture Therapy* : 117-140.
- Sauerwein W, Wittig A, Moss R, Nakagawa Y. 2012. *Neutron Capture Therapy - Principles and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin
- Sofiya, Choudhary. 2018. Deterministic and Stochastic Effects of Radiation. *Cancer Therapy and Oncology International Journal*, **Vol. 12 No. 2**: October 1-2.
- Tesalonika, Adrian, Andang Widi Harto, Yohannes Sardjono, dkk. 2016. Dosimetry of in vitro and in vivo Trials in Thermal Column Kartini Reactor for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) facility by using MCNPX Simulator Code. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Aplications*. **Vol. 1 No. 2 Juni** : 63-72.
- Tsurayya H. N, Sari Y. A, dan Wijaya G. S. 2020. Pemodelan Shielding Berbahan Parafin Dan Aluminium Untuk Fasilitas Bnct Menggunakan Simulator MCNP. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, **Volume 35**.
- Xoubi N. 2016. Calculation of The Power and Absolute Flux of A Source Driven Subcritical Assembly Using Monte Carlo MCNP Code. *Annals of Nuclear Energy*, **Volume 97, November**, Pages 96-101.