

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xiii
INTISARI.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1. Latar Belakang.....	1
I.2. Perumusan Masalah.....	8
I.3. Batasan Masalah.....	9
I.4. Tujuan Penelitian.....	10
I.5. Manfaat Penelitian.....	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
BAB III DASAR TEORI.....	18
BAB IV PELAKSANAAN PENELITIAN.....	34
IV.1. Alat dan Bahan Penelitian.....	34
IV.2. Tata Laksana Penelitian.....	34
IV.2.1. Penyusunan Setelan General tiap Sesi Simulasi secara Umum.....	34
IV.2.2. Setelan Sesi Simulasi Pengambilan Data Primer.....	38
IV.2.3. Penyusunan Setelan Sesi Simulasi Replikasi Pertama.....	40
IV.2.4. Penyusunan Setelan Sesi Simulasi Replikasi Kedua.....	41
IV.3. Rencana Analisis Hasil Simulasi.....	46
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
V.1. Hasil Simulasi Sesi Primer dan Penaksiran RBE.....	47
V.2. Hasil Simulasi dan Penaksiran dari Replikasi Hasil Publikasi Pertama....	59
V.3. Hasil Simulasi dan Penaksiran dari Replikasi Hasil Publikasi Kedua.....	63
V.4. Pembahasan.....	69





UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

**Studi Simulasi Monte Carlo Untuk Menentukan Nilai Efektivitas Biologis Relatif Terapi Proton  
Menggunakan Kode TOPAS v4.0.0**

Aldino Putra Andeaz, Dr.-Ing. Ir. Kusnanto; M. Arif Efendi, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN .....	86
VI.1. Kesimpulan .....	86
VI.2. Saran.....	87
DAFTAR PUSTAKA .....	88
LAMPIRAN A .....	91
LAMPIRAN B .....	97



## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Tabulasi jumlah pasien diobati untuk tiap jenis kanker .....	2
Tabel 2.1. Tabulasi parameter daya ( $p$ ) untuk formasi SOBP berbagai energi .....	13
Tabel 3.1. Ringkasan mode interaksi fisika berkas proton dengan materi dan konsekuensinya .....	20
Tabel 5.1. Daftar 21 beamlet ( $E=170$ MeV, $\chi=20\%$ ) yang akan disisipkan ke hierarki Control Files.....	49
Tabel 5.2. Daftar 21 beamlet ( $E=170$ MeV, $\chi=30\%$ ) yang akan disisipkan ke hierarki Control Files.....	50
Tabel 5.3. Daftar 21 beamlet ( $E=170$ MeV, $\chi=40\%$ ) yang akan disisipkan ke hierarki Control Files.....	51
Tabel 5.4. Daftar 21 beamlet hasil translasi fisika SOBP [33] ke hierarki Control Files.....	60
Tabel 5.5. Tabulasi nilai RBE SOBP 182,8 MeV lebar 6 cm meniru fisika SOBP [33] dengan RBE terlapor .....	62
Tabel 5.6. Daftar 21 beamlet hasil translasi setelan fisika SOBP eksperimen A, C, dan D [32] ke hierarki Control Files .....	64
Tabel 5.7. Daftar 21 beamlet hasil translasi setelan fisika SOBP eksperimen B [32] ke hierarki Control Files.....	65
Tabel 5.8. Daftar 21 beamlet hasil translasi setelan fisika SOBP eksperimen E [32] ke hierarki Control Files.....	66
Tabel 5.9. Tabel ringkasan hasil simulasi replikatif.....	71



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Jumlah pasien yang telah diobati hingga tahun 2022 (biru: PBT; jingga: CIRT) .....	2
Gambar 1.2. Nilai RBE 1,1 sepanjang SOBP berkas PBT .....	6
Gambar 2.1. Beberapa SOBP yang disimulasikan dalam perangkat lunak TOPAS .....	12
Gambar 3.1. Skema kemungkinan interaksi fisika berkas proton dengan materi; (a) interaksi coulomb inelastik; (b) interaksi coulomb elastik; (c) interaksi nuklir.....	19
Gambar 3.2. Profil Bragg Peak (BP) pristine.....	23
Gambar 3.3. Profil Spread-Out Bragg Peak (SOBP).....	24
Gambar 3.4. Nilai RBE pada berbagai nilai LET [31].....	27
Gambar 3.5. RBE-weighted dose untuk berkas PBT 152 MeV.....	29
Gambar 3.6. Cara kerja setelan OpenTOPAS menggunakan TOPAS Parameter Control Files.....	33
Gambar 4.1. Model biological scorer OpenTOPAS-RBE dan sub-scorer yang diinisiasi [41].....	37
Gambar 4.2. Hierarki TOPAS Parameter Control Files .....	37
Gambar 4.3. Diagram alir sesi simulasi pengambilan data primer .....	39
Gambar 4.4. Diagram alir uji publikasi [33] sebagai eksperimen radiobiologi virtual .....	41
Gambar 4.5. Diagram alir uji publikasi [32] sebagai eksperimen radiobiologi virtual .....	42
Gambar 5.1. Hasil olahan data primer untuk SOBP 170 MeV lebar 20%, yaitu: (a) kurva PDD dan lokasi titik fraksi dosis; (b) hasil penaksiran RBE; (c) profil LET sepanjang SOBP.....	53
Gambar 5.2. Hasil olahan data primer untuk SOBP 170 MeV lebar 30%, yaitu: (a) kurva PDD dan lokasi titik fraksi dosis; (b) hasil penaksiran RBE; (c) profil LET sepanjang SOBP.....	54



Gambar 5.3. Hasil olahan data primer untuk SOBP 170 MeV lebar 40%, yaitu: (a) kurva PDD dan lokasi titik fraksi dosis; (b) hasil penaksiran RBE; (c) profil LET sepanjang SOBP.....	56
Gambar 5.4. Kurva PDD dengan posisi kedalaman nilai fraksi dosis tertentu menurut laporan [33].....	61
Gambar 5.5. Tampilan grafikal RBE hasil simulasi dengan penaksir Wedenberg dibanding nilai RBE yang dilaporkan [33].....	61
Gambar 5.6. Hasil prediksi SF dibanding nilai SF <sub>2</sub> eksperimen A terlapor.....	67
Gambar 5.7. Hasil prediksi SF dibanding nilai SF <sub>2</sub> eksperimen B terlapor.....	67
Gambar 5.8. Hasil prediksi SF dibanding nilai SF <sub>2</sub> eksperimen C terlapor.....	67
Gambar 5.9. Hasil prediksi SF dibanding nilai SF <sub>2</sub> eksperimen D terlapor.....	68
Gambar 5.10. Hasil prediksi SF dibanding nilai SF <sub>2</sub> eksperimen E terlapor.....	68
Gambar 5.11. Kurva profil LET pada seluruh hasil kajian skripsi; beberapa saja ditampilkan yaitu sesuai studi (a) Maeda dkk.; dan (b) Aoki-Nakano dkk. eksperimen B.....	73
Gambar 5.12. Hubungan RBE terhadap LET yang ditampilkan publikasi [30] ...	80
Gambar B.1. Tampilan Visual Proses Simulasi.....	98
Gambar B.2. Tampilan Akuisisi Data Mentah Hasil Simulasi.....	99
Gambar B.3. Tampilan Masuk Jupyter Notebook Melalui Terminal.....	99
Gambar B.4. Implementasi Kode Pemroses Data Mentah.....	100



## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

### Lambang

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
$\alpha$	Koefisien radiosensitivitas	Gy <sup>-1</sup>
$\alpha_c$	Nilai parameter bortfeld	cm MeV <sup>-1</sup>
$\beta$	Koefisien radiosensitivitas	Gy <sup>-2</sup>
D	Dosis total	Gy
d	Dosis per fraksi	Gy
E	Energi	MeV atau KeV
ek	Energi terkait nilai k ke-n	MeV
K	konstanta	-
k	Nilai semua n, dari 0 hingga 21	-
p	Parameter daya	-
R	Jangkauan	cm
rk	Jangkauan terkait nilai k ke-n	cm
S	<i>Mass stopping power</i>	MeV/mm atau KeV/ $\mu$ m
wk	Bobot <i>beamlet</i> nilai k ke-n	-
x	Jarak	cm
$\rho$	densitas	g/cm <sup>3</sup>
$\chi$	Persentase lebar SOBP	-



## Singkatan

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BP	<i>Bragg Peak</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CIRT	<i>Carbon Ion Radiotherapy</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DICOM	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i>
DNA	<i>Deoxyribonucleic Acid</i>
DRR	<i>Digital Reconstruction Radiography</i>
DSB	<i>Double strand break</i>
ICRU	<i>International Commission on Radiation Units and Measurements</i>
IMRT	<i>Intensity Modulated Radiation Therapy</i>
LET	<i>Linear Energi Transfer</i>
LQ	<i>Linear quadratic</i>
MCNPX	<i>Monte Carlo N Particle Xtended</i>
MCS	<i>Multiple coulomb scattering</i>
PDD	<i>Percentage depth dose</i>
PBT	<i>Proton Beam Therapy</i>
RBE	<i>Relative Biological Effectiveness</i>
RMF	<i>Repair-Misrepair Fixation</i>
SOBP	<i>Spread-Out Bragg Peak</i>
TOPAS	<i>TOol for PArticle Simulation</i>
TPS	<i>Treatment Planning System</i>
TRS	<i>Technical Report Series</i>
VMAT	<i>Volumetric Modulated Arc Therapy</i>

