

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| REKOMENDASI LAYAK UJIAN TESIS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS..... | iv |
| KATA PENGANTAR | vi |
| ABSR TAK..... | viii |
| <i>ABSTRACT</i> | ix |
| DAFTAR ISI..... | x |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL..... | xxi |
| ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN | xxvi |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Tujuan Penelitian..... | 4 |
| 1.3. Manfaat Penelitian..... | 4 |
| BAB II DASAR TEORI | 5 |
| 2.1. Karakteristik Fisik Proton | 5 |
| 2.1.1. Perlambatan (<i>Stopping</i>)..... | 5 |
| 2.1.2. Hamburan (<i>Scattering</i>) | 6 |
| 2.1.3. Interaksi Nuklir (Nuclear Interactions)..... | 8 |
| 2.1.4. <i>Fluence</i> , Daya Henti (<i>Stopping Power</i>), dan Dosis | 9 |
| 2.1.5. Puncak Bragg (Bragg Peak)..... | 10 |
| 2.1.6. <i>Water Equivalent Thickness</i> (WET) | 11 |
| 2.2. Rentangan <i>Therapeutik</i> | 12 |
| 2.3. Akselerator Proton..... | 13 |
| 2.4. Teknik Proton <i>Spot-Scanning Pencil Beam</i> | 14 |
| 2.5. <i>Geometry and Tracking</i> (Geant4)..... | 16 |
| 2.6. Metode Monte Carlo | 16 |
| 2.6.1. <i>Physics List QGSP_BIC_HP</i> pada Geant4 | 18 |
| 2.7. <i>Coefficient of Variance (CV)</i> | 20 |

| | |
|--|----|
| 2.8. Phantom Komputasi Mesh Type Reference Computational Phantoms (MRCPs)..... | 21 |
| 2.9. Perencanaan Klinis pada Radioterapi Eksternal..... | 23 |
| 2.10. Optimasi Multi-Kriteria Dan Ranking Konfigurasi Sudut Berkas. | 25 |
| 2.10.1. Konsep <i>Multi-Criteria Optimization</i> dalam Radioterapi Proton | 26 |
| 2.10.2. Weighted Scalarization dan Definisi OAR Score..... | 27 |
| 2.10.3. Skenario Pembobotan Multi-Pasien (<i>Clinical Scenarios</i>) | 29 |
| 2.10.4. Analisis Sensitivitas: Ranking dan Stabilitas Kombinasi | 45 |
| 2.10.5. Robustness Terhadap Heterogenitas Jaringan | 46 |
| BAB III METODE PENELITIAN..... | 48 |
| 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian | 48 |
| 3.2. Alat dan Bahan Penelitian | 48 |
| 3.3. Batasan Simulasi | 48 |
| 3.4. Validasi Simulasi..... | 49 |
| 3.5. Perhitungan WET Prostat..... | 52 |
| 3.6. Simulasi SOBP | 54 |
| 3.6.1. Simulasi Central Axis Dose..... | 55 |
| 3.6.2. Weighting Fraction Spread Out Bragg Peak (SOBP)..... | 59 |
| 3.7. Simulasi Pemaparan Prostat | 61 |
| 3.7.1. Perancangan Konfigurasi Berkas SOBP untuk Prostat..... | 63 |
| 3.8. Simulasi Fantom ICRP 145..... | 63 |
| 3.9. Analisis Data Dosis OAR dan Optimasi Kombinasi Sudut Berkas | 67 |
| 3.9.1. Ekstraksi dan Preprocessing Data Dosis OAR..... | 67 |
| 3.9.2. Ekstraksi Dosis Per-Organ..... | 67 |
| 3.9.3. Averaging Across Multiple Beams..... | 68 |
| 3.9.4. Perhitungan OAR_Score dan Skenario Pembobotan Multi-Pasien..... | 68 |
| 3.9.5. Definisi OAR_Score | 68 |
| 3.9.6. Skenario Pembobotan Multi-Pasien..... | 69 |
| 3.9.7. Analisis Sensitivitas Ranking dan Identifikasi TOP STABLE..... | 70 |
| 3.9.8. Analisis Sensitivitas terhadap Heterogenitas Jaringan | 72 |
| 3.9.9. Klasifikasi Berdasarkan Sensitivitas..... | 75 |

| | |
|--|-----|
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 78 |
| 4.1. Validasi Simulasi..... | 78 |
| 4.2. Perhitungan WET Prostat..... | 79 |
| 4.3. Simulasi SOBP | 86 |
| 4.3.1 Simulasi Central Axis Dose..... | 86 |
| 4.3.2. Weighting Fraction SOBP | 88 |
| 4.4. Simulasi Pemaparan Prostat | 91 |
| 4.4.1 Perancangan Konfigurasi Berkas SOBP untuk Prostat..... | 91 |
| 4.5. Simulasi Fantom ICRP 145..... | 120 |
| 4.5.1. Distribusi Dosis Multi Arah pada Prostat | 147 |
| 4.6. Ekstraksi Dosis OAR dari 510 Kombinasi..... | 165 |
| 4.7. Analisis Multi Criteria Robustness: Ranking Stability | 182 |
| 4.8. Analisis Robustness terhadap Heterogenitas Jaringan | 195 |
| BAB V PENUTUP..... | 209 |
| 5.1. Kesimpulan..... | 209 |
| 5.2. Saran..... | 209 |
| DAFTAR PUSTAKA | 210 |
| LAMPIRAN..... | 223 |