

Analisis Efektivitas Sumber Radiasi pada Brakiterapi Paru-paru Kiri berdasarkan Jumlah *Seed* menggunakan Simulasi Monte Carlo

S Juari*, Yudha Arman, Nurhasanah, Fajar Arianto

Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. Hadari Namawi, Pontianak

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 3 Maret 2023
Direvisi: 21 Maret 2023
Diterima: 21 Maret 2023

Kata kunci:

Brakiterapi
Kanker paru-paru
Monte Carlo
Sumber radionuklida

Keywords:

brachytherapy
lung cancer
monte carlo
radionuclide source

Penulis Korespondensi:

S. Juari
Email: sjuari@student.untan.ac.id

ABSTRAK

Menurut *Global Burden of Cancer Study* (Globocan) dari *World Health Organization* (WHO) pada 2020, dari 19,3 juta kasus kanker sekitar 10 juta kematian akibat kanker. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan sumber radiasi efektif pada pengobatan brakiterapi kanker paru-paru kiri menggunakan MCNP6 berdasarkan variasi jumlah *seed* yang dilakukan pada *phantom* ORNL-MIRD 1996. *Seed* atau benih sumber radiasi diletakkan secara acak pada geometri paru-paru kiri dengan *tally* F8 dan NPS (*N-particle source*) sebesar 1000000 kemudian diperoleh hasil *running* berupa energi deposisi yang diterima organ paru-paru kiri dan organ lainnya seperti paru-paru kanan, jantung, hati dan pankreas dalam satuan MeV/Trans kemudian dikonversi menjadi Joule/Trans yang selanjutnya dibagi dengan massa organ untuk mendapatkan dosis serap dengan satuan gray (Gy). Dosis optimal yang digunakan untuk brakiterapi paru-paru dalam dunia medis sebesar 42 Gy, diperoleh jumlah *seed* untuk menghasilkan dosis serap optimal tersebut dari setiap sumber radiasi I-125, Pd-103 dan Cs-131 dengan jumlah *seed* berturut-turut 29, 61 dan 148 *seed*. Berdasarkan perbandingan jumlah *seed* tersebut, sumber radiasi yang dianggap paling efektif untuk pengobatan kanker paru-paru kiri adalah I-125.

In 2020 according to the Global Burden of Cancer Study (Globocan) from the World Health Organization (WHO), from 19.3 million cancer cases, around 10 million cancer deaths. This study aims to obtain an effective radiation source in the treatment of left lung cancer brachytherapy using MCNP6 based on variations in the number of seeds carried out on the 1996 ORNL-MIRD Phantom. Seed or radiation sources are placed randomly on the geometry of the left lung with an F8 tally and an NPS (N-particle source) of 1000000 next running results are obtained in the form of energy deposition received by the left lung and other organs such as the right lung, heart, liver, and pancreas in MeV/Trans units and then converted to Joule/Trans which is then divided by organ mass to get the absorbed dose in units of gray (Gy). The optimal dose used for lung brachytherapy in the medical world is 42 Gy, the number of seeds obtained to produce the optimal absorption dose from each radiation source I-125, Pd-103, and Cs-131 with the number of seeds 29, 61, and 148. Based on the comparison of the number of seeds, the radiation source considered the most effective for the treating left lung cancer is I-125.

Copyright © 2023 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Kanker merupakan salah satu penyakit yang mematikan di seluruh dunia. Menurut *Global Burden of Cancer Study* (Globocan) dari *World Health Organization* (WHO) pada 2020, di Indonesia total kasus kanker mencapai 396.914 kasus dengan total kematian sebesar 234.511 kasus. Kanker paru-paru merupakan tumor ganas yang diperoleh dari epitel bronkus (Joseph and Rotty, 2020), memiliki jumlah kasus kematian sebanyak 34.783 (Sung *et al.*, 2021). Salah satu upaya pengobatan kanker dengan metode terapi radiasi adalah brakiterapi. Brakiterapi merupakan jenis radioterapi internal yang dilakukan secara langsung dengan menanamkan sumber radionuklida ke dalam atau dekat dengan jaringan target untuk membunuh sel kanker. Pada umumnya, terdapat tiga jenis brakiterapi utama menurut laju dosis radiasi yaitu *low dose rate* (LDR), *medium dose rate* (MDR), dan *high dose rate* (HDR). Berdasarkan durasi isotop radionuklida di area target brakiterapi terdiri dari dua kategori yaitu penanaman *seed* sementara (*temporary implant seed*) dan penanaman *seed* permanen (*permanent implant seed*). *Seed* atau benih merupakan sebuah medium yang berisi sumber radionuklida terbuat dari logam titanium (Deng *et al.*, 2017; Saptiama *et al.*, 2014). Penggunaan terapi radiasi pada kanker yang memanfaatkan radioaktivitas masih sangat terbatas (Fitriatuzzakiyyah *et al.*, 2017). Radioaktivitas merupakan kemampuan inti atom yang tidak stabil dalam memancarkan radiasi dan meluruh menjadi inti stabil (Malaka, 2019).

Berbagai aspek yang perlu diperhitungkan dan direncanakan sebelum pengobatan brakiterapi seperti pemilihan sumber radiasi dan *Treatment Planning System* (TPS). TPS merupakan sistem perencanaan perawatan pada pasien sebelum dilakukan terapi radiasi brakiterapi (Putra *et al.*, 2015; Saptiama *et al.*, 2014). Fungsi TPS adalah sebagai algoritma untuk simulasi distribusi dosis radiasi yang diupayakan semaksimal mungkin pada daerah jaringan tumor/kanker (Yahya *et al.*, 2018). Perencanaan tersebut berupa simulasi penanaman atau penempatan *seed* dan distribusi energi deposisi serta perhitungan dosis serap pada medium untuk efektivitas pengobatan. Metode untuk simulasi tersebut ada banyak, salah satu metode yang menarik untuk digunakan adalah metode monte carlo (Ubaidillah, 2021).

Metode monte carlo didefinisikan sebagai metode statistik yang menggunakan bilangan acak sebagai dasar untuk simulasi situasi tertentu. *Monte Carlo N-Particle* (MCNP) adalah *software* berbasis metode monte carlo. *Monte Carlo N-Particle 6* (MCNP6) merupakan versi terbaru dari MCNP dan penggabungan dari MCNP5 dan MCNPX yang dirancang untuk menghitung transportasi foton, neutron, dan elektron menggunakan algoritma stokastik (Kasmudin, 2017; Kristiyanti and Karyanta, 2014). Beberapa fitur baru yaitu penghitungan kecepatan kisi peningkatan, digunakan untuk banyak masalah fisika medis (Gray *et al.*, 2020). MCNP6 juga mempunyai persyaratan untuk input file yang berisi mengenai geometri dan sumber partikel yang digunakan dalam simulasi. Struktur input MCNP terdiri dari tiga bagian utama yaitu kartu sel, kartu permukaan, dan kartu data (Kurniawan, 2021; Werner *et al.*, 2017).

Berdasarkan penjabaran tersebut, pada penelitian ini dilakukan simulasi pengobatan brakiterapi pada paru-paru kiri pada *phantom* ORNL-MIRD 1996 dengan memvariasikan jumlah *seed* dan sumber radiasi. Langkah variasi tersebut adalah sebagai upaya untuk mendapatkan sumber radiasi dengan jumlah *seed* minimal untuk menghasilkan dosis serap optimal.

II. METODE

Penelitian ini merupakan simulasi pengobatan brakiterapi kanker paru-paru kiri menggunakan metode monte carlo. Penelitian ini dilakukan menggunakan komputer dengan *operating system* Windows 10 Pro 64-bit intel® core™ i7-7700 CPU @360 Hz RAM 8, dengan *software* MCNP6.1©, *Total commander* 64bit, *Notepad++* dan *vised* MCNPX. *Phantom* yang digunakan adalah *phantom* ORNL-MIRD 1996.

2.1 Model Sumber Radiasi

Sumber radiasi pada penelitian ini diletakkan secara acak dan dimodelkan dalam bentuk titik yang ditanamkan langsung ke dalam paru-paru kiri dengan variasi jumlah *seed*. Sumber radiasi foton dan elektron yang digunakan adalah Pd-103, Cs-131 dan I-125, aktivitas/energi berturut-turut sebesar 2 mCi/21 KeV, 2 mCi/30,4 KeV dan 2 mCi/35,5 KeV (Susila and Satmoko, 2010) dengan variasi jumlah *seed* adalah 10, 20, 30, 40, 50, 60 dan 70.

2.2 Pemilihan *Tally* dan Penentuan NPS (*N-particle source*)

2.2.1 Pemilihan *Tally*

Tally merupakan spesifikasi perhitungan yang diakumulasi saat simulasi, perhitungan tersebut berupa nilai fluks atau energi dalam satuan tertentu. *Tally* pada MCNP6 meliputi *tally* F_n dengan nomor 1,2,3,4,5,6,7 dan 8, masing-masing nomor memiliki tujuan kalkulasi numerik yang berbeda-beda. Pada penelitian ini digunakan *tally* F8 atau *tally* pulsa tinggi, *tally* F8 memberikan pulsa distribusi energi dengan satuan “pulse” yang kemudian diubah ke dalam energi deposisi tiap satuan muatan elektron dengan satuan “MeV”.

2.2.2 Penentuan NPS (*N-particle source*)

N-particle source (NPS) merupakan tahap akhir sebelum dilakukan *running* pada *file script*, jumlah NPS menentukan secara spesifik jumlah partikel dan perjalanan foton dan elektron akan berhenti sesuai NPS *card* tepat pada jumlah yang telah ditentukan. Pada penelitian ini jumlah NPS yang digunakan sebesar 1000000. Setelah ditentukan jumlah NPS selanjutnya dilakukan *running* pada *software total commander* dengan *input* “MCNP6 INP = nama *file script* OUT = nama *file hasil*”.

2.3 Perhitungan Dosis Serap dan Dosis Efektif

Berdasarkan energi deposisi yang diperoleh dari *running*, perhitungan dosis serap dan dosis efektif untuk masing-masing organ dapat ditentukan dengan sumber radiasi yang berbeda. Namun, sebelum itu diperlukan nilai-nilai tambahan, seperti nilai massa organ paru-paru (m), waktu paruh (T) dan bilangan transformasi (U_s).

$$m = \rho.V \quad (1)$$

$$T = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2)$$

$$U_s = A_0.T.jumlahseed \quad (3)$$

$$D = \frac{dE}{dm} U_s \quad (4)$$

$$E_R = W_R.W_T.D \quad (5)$$

dengan m adalah massa organ paru-paru, ρ adalah densitas organ dan V adalah volume organ. τ adalah waktu paruh dari radionuklida dan λ adalah konstanta laju peluruhan. U_s adalah bilangan transformasi, A_0 adalah aktifitas awal radioaktif, dan T adalah umur hidup radioaktif. D merupakan dosis serap (Gy), dE adalah satuan energi deposisi yang diserap jaringan (J), dm adalah massa jaringan yang menyerap energi (Kg), E_R merupakan dosis efektif (Sv), W_R adalah faktor bobot radiasi dan W_T adalah Faktor bobot jaringan/organ.

2.4 Perhitungan *Seed* Isodosis Paru-paru kiri

Berdasarkan perhitungan dosis serap yang telah diperoleh maka grafik pengaruh kenaikan jumlah *seed* terhadap dosis serap yang diterima paru-paru kiri dapat ditentukan. Dari grafik tersebut diperoleh hubungan antara jumlah *seed* dan dosis serap serta diperoleh persamaan garis sebagai berikut.

$$y = mx + c \quad (6)$$

dengan y merupakan variabel dosis serap optimal, x adalah variabel jumlah *seed* yang menghasilkan dosis optimal, m yaitu gradien dari garis lurus dan c adalah konstanta.

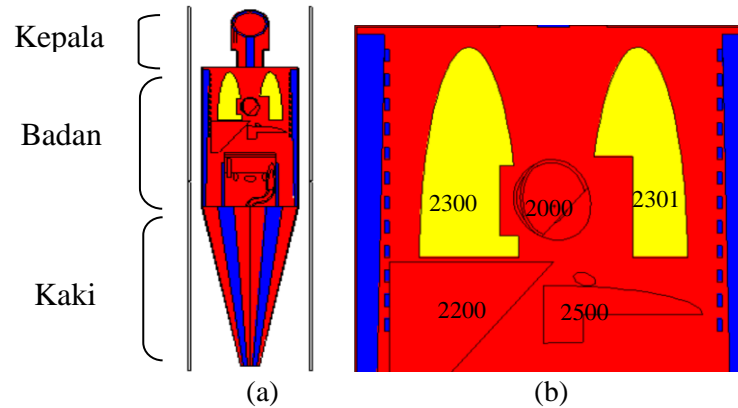
2.5 Analisis Efektifitas Dosis Serap Terhadap Jumlah *Seed*

Berdasarkan hasil perhitungan dan grafik dosis serap yang diperoleh maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisis efektifitas jumlah *seed* terhadap dosis serap dan menentukan sumber radiasi

yang paling efektif. Analisis ini dilihat dari efektifitas jumlah *seed* yang memberikan dosis serap secara optimal pada organ paru-paru kiri, dan dosis serap yang diberikan pada organ lain seminimal mungkin.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Bentuk *Phantom* ORNL-MIRD 1996



Gambar 1 *Phantom* ORNL-MIRD 1996 (a) tampak depan (XZ) (b) Geometri paru-paru dan organ sekitarnya

Gambar 1(a) merupakan bentuk dari *phantom* dengan sumbu XZ yang ditampilkan pada *visual editor* (vised). Geometri *phantom* tersebut dibuat dengan *listing program* dari Oak Ridge National Laboratory-Medical International Radiation Dosimetry (ORNL-MIRD). Berdasarkan gambar 1(b), organ paru-paru kiri ditunjukkan dengan nomor sel 2301 yang dimodelkan dengan densitas 0,296 kg/liter dan *volume* sebesar 1,560 liter, nomor sel 2300 menunjukkan organ paru-paru kanan dimodelkan dengan densitas 0,296 kg/liter dan *volume* 1,810 liter, nomor sel 2000 menunjukkan organ jantung yang dimodelkan dengan densitas 1,040 kg/liter dan *volume* 1,7700 liter, nomor sel 2200 menunjukkan organ hati yang dimodelkan dengan densitas 1,040 kg/liter dan *volume* 0,0637 liter dan untuk pankreas memiliki nomor sel 2500 yang dimodelkan dengan densitas sebesar 1,040 kg/liter dan *volume* 0,907 liter.

Warna-warna pada Gambar 1 menunjukkan perbedaan densitas material masing-masing bagian organ penyusun *phantom*. Warna-warna tersebut merupakan penunjuk bagian-bagian organ dan lingkungan pada *phantom*. Warna putih menunjukkan lingkungan di luar *phantom* (udara), warna merah menunjukkan jaringan lunak, warna biru menunjukkan tulang, dan warna kuning menunjukkan paru-paru.

3.2 Distribusi Dosis Serap

Distribusi dosis dalam penelitian ini diperoleh dari hasil *running* MCNP6. Hasil *running* berupa energi per transformasi dengan satuan MeV/Trans yang diterima oleh paru-paru kiri ditunjukkan pada Tabel berikut.

Tabel 1 Hasil *running* sumber radiasi I-125

<i>Seed</i>	Energi/trans (MeV/Trans)				
	Paru-paru kiri $\times 10^{-3}$	Paru-paru kanan $\times 10^{-5}$	Jantung $\times 10^{-5}$	Hati $\times 10^{-5}$	Pankreas $\times 10^{-6}$
10	7,8118	5,8216	1,1419	2,7010	1,2458
20	7,8032	5,9331	0,1163	2,5928	0,1210
30	7,8141	5,8425	0,1169	2,7130	0,1279
40	7,7904	5,8270	0,1191	2,8621	0,1242
50	7,6903	5,7158	0,1152	2,7723	1,2488
60	7,5455	5,3034	1,0936	2,7688	1,2147
70	7,3808	5,0312	0,1051	2,6319	1,1460
Rata-rata	7,6909	5,6392	8,5024	2,7203	6,0253

Tabel 2 Hasil *running* sumber radiasi Pd-103

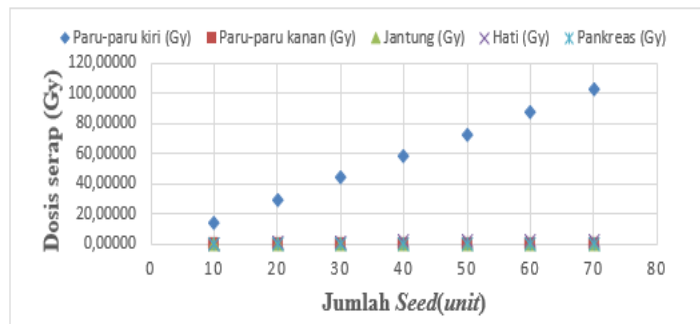
<i>Seed</i>	Energi/trans (MeV/Trans)				
	Paru-paru kiri $\times 10^{-2}$	Paru-paru kanan $\times 10^{-7}$	Jantung $\times 10^{-6}$	Hati $\times 10^{-8}$	Pankreas $\times 10^{-7}$
10	1,2942	6,0629	7,1629	1,9947	3,9613
20	1,2946	5,6387	7,0750	6,0531	3,7181
30	1,2952	5,8550	7,4699	0,1201	2,7248
40	1,2916	5,6416	7,2281	0,0000	2,4831
50	1,2719	4,8381	6,9699	19,359	4,3624
60	1,2423	5,2146	7,1158	814,25	3,1456
70	1,2066	4,8086	6,1143	6,0717	1,8634
Rata-rata	1,2709	5,4371	7,0194	3,7729	3,1798

Tabel 3 Hasil *running* sumber radiasi Cs-131

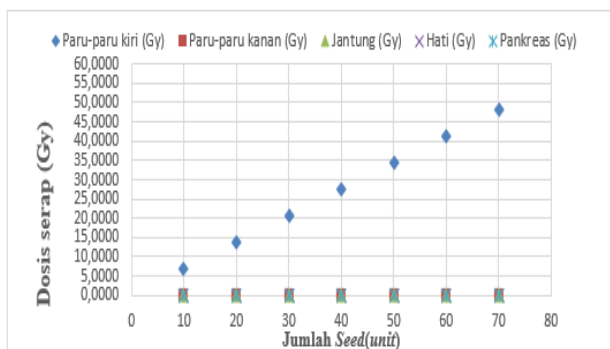
<i>Seed</i>	Energi/trans (MeV/Trans)				
	Paru-paru kiri $\times 10^{-3}$	Paru-paru kanan $\times 10^{-5}$	Jantung $\times 10^{-5}$	Hati $\times 10^{-6}$	Pankreas $\times 10^{-6}$
10	9,2885	2,8092	7,6331	0,1006	6,6512
20	9,2826	2,7291	7,6304	9,4184	6,4252
30	9,2917	2,7499	7,5960	9,4544	6,9045
40	9,2747	2,6733	7,8092	9,6746	6,6932
50	9,1419	2,6267	7,6289	1,0270	6,4703
60	8,9500	2,4701	7,2522	9,3552	6,5622
70	8,7322	2,2765	6,8410	8,2752	6,3077
Rata-rata	9,1374	2,6193	7,4844	8,1813	6,5735

Satuan nilai rata-rata energi deposisi pada tabel-tabel di atas merupakan hasil keluaran dari *running*. Rata-rata energi deposisi dikonversi ke dalam satuan energi Joule/Trans ($1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ Joule}$), kemudian dibagi massa organ untuk mengetahui dosis per transformasi (Gy/Trans). Selanjutnya, dihitung nilai bilangan transformasi menggunakan persamaan (3), dengan nilai konstanta peluruhan (A_0) untuk sumber radionuklida Pd-103, Cs-131, dan I-125 berturut-turut sebesar $4,74 \times 10^{-7}$, $8,26 \times 10^{-7}$ dan $1,35 \times 10^{-7}$ peluruhan/sekon.

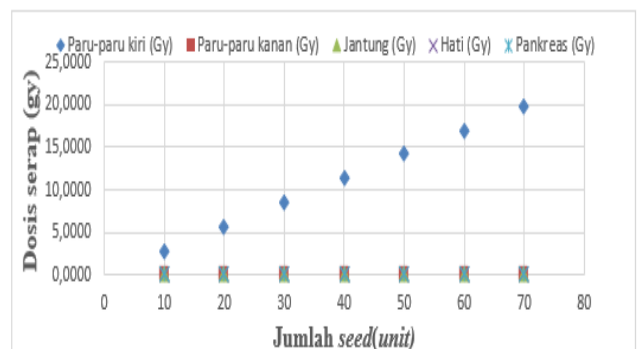
3.3 Distribusi Dosis Serap



(a)



(b)



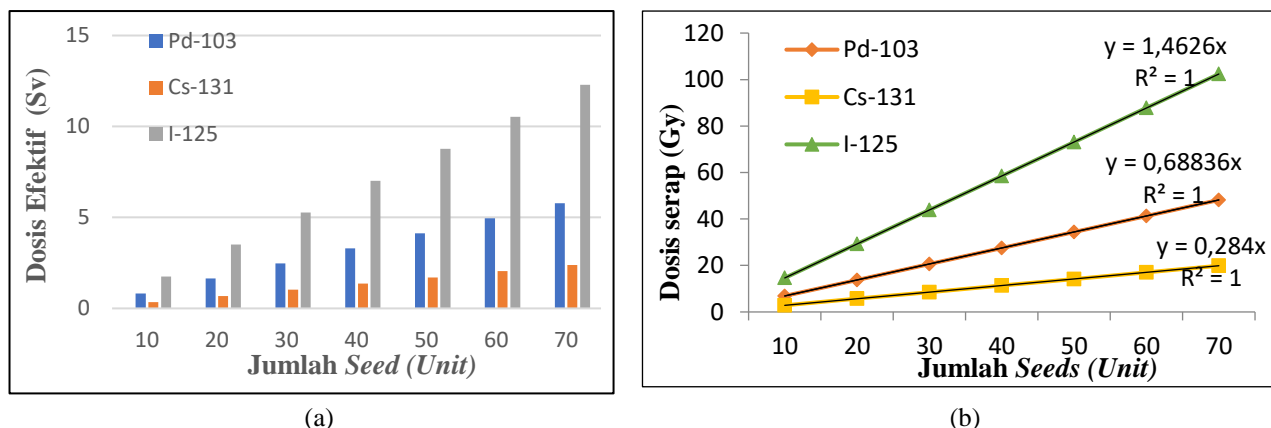
(c)

Gambar 2 (a) Grafik distribusi dosis serap sumber I-125, (b) Grafik distribusi dosis serap sumber Pd-103, dan (c) Grafik distribusi dosis serap sumber Cs-131.

Gambar 2(a) menunjukkan radiasi radionuklida I-125 yang banyaknya dosis serap radiasi yang diterima paru-paru kiri dengan variasi jumlah *seed* 10-70 kisaran 14,6258 Gy hingga 102,3806 Gy dan jaringan lain seperti paru-paru kanan, jantung, hati dan pankreas menerima dosis serap radiasi relatif

rendah berkisar 0,01316 Gy hingga 2,52405 Gy. Gambar 2(b) menunjukkan grafik distribusi dosis serap untuk sumber radionuklida Pd-103. Pada paru-paru kiri sebesar 6,8836 Gy hingga 48,1852 Gy dan pada organ lain seperti paru-paru kanan, jantung, hati dan pankreas memiliki distribusi dosis serap berkisar 0,0001 Gy hingga 0,0067 Gy. Gambar 2(c) merupakan grafik distribusi dosis serap radiasi yang diterima paru-paru kiri dengan sumber radionuklida Cs-131, berkisar 2,84 Gy hingga 19,88 Gy dan pada organ lainnya sebesar 0,0058 Gy hingga 0,1241 Gy. Distribusi dosis serap radiasi yang diterima paru-paru kiri dari sumber radionuklida relatif meningkat seiring bertambahnya jumlah *seed* yang digunakan. Sedangkan dosis serap radiasi yang diterima oleh organ lain yang ada di sekitarnya cenderung kecil dan tidak terpengaruh oleh jumlah *seed*.

3.4 Distribusi Dosis Efektif dan Perbandingan *Seed* Isodosis Sumber Radionuklida



Gambar 3 (a) Grafik dosis efektif pada paru-paru kiri, (b) Grafik hubungan jumlah *seed* dan dosis serap pada paru-paru tiap sumber radiasi

Gambar 3(a) menunjukkan nilai dosis efektif pada organ paru-paru kiri yang diperoleh dari persamaan (5), dengan nilai faktor bobot jaringan (W_T) sebesar 0,12 dan nilai faktor bobot radiasi (W_R) sebesar 1. Berdasarkan penelitian sebelumnya, untuk mencapai dosis efektif pada pengobatan brakiterapi kanker paru-paru pada kedalaman 2 cm diperlukan dosis serap optimal sebesar 42 Gy (Gaspar, 1998), maka untuk nilai dosis efektif berdasarkan persamaan (5) sebesar 5,04 Sv. Dari grafik pada Gambar 3(a), sumber radiasi I-125 mendekati dosis efektif sebesar 5,265 Sv pada jumlah *seed* 30, sumber radiasi Pd-103 dengan jumlah *seed* 60 dosis efektif sebesar 4,956 Sv dan sumber radiasi Cs-131 tidak dapat mencapai dosis efektif yang diinginkan.

Gambar 3(b) merupakan grafik hubungan kenaikan dosis serap terhadap pertambahan jumlah *seed*. Berdasarkan grafik tersebut diperoleh nilai hubungan linear antara jumlah *seed* dan dosis serap dari yang tinggi ke rendah berturut-turut adalah I-125, Pd-103, dan Cs-131 memiliki persamaan garis sebagai berikut.

$$y_{I-125} = 1,4626x \quad (7)$$

$$y_{Pd-103} = 0,6883x \quad (8)$$

$$y_{Cs-131} = 0,284x \quad (9)$$

Nilai y merupakan dosis serap optimal dan x adalah jumlah *seed* yang diimplankan untuk mencapai dosis serap optimal. Penanganan brakiterapi kanker paru-paru pada kedalaman 2 cm menggunakan dosis sebesar 42 Gy. Berdasarkan persamaan (7), (8), dan (9) dengan $y = 42$ Gy diperoleh jumlah *seed* (x) untuk sumber radiasi I-125, Pd-103, dan Cs-131 secara berturut-turut adalah 29 *seed*, 61 *seed*, dan 148 *seed*.

Berdasarkan hasil perbandingan jumlah *seed* isodosis tersebut, maka jumlah *seed* paling minimum untuk pengobatan kanker paru-paru kiri adalah pada sumber radionuklida I-125. Penanaman *seed* brakiterapi kanker paru-paru kiri disesuaikan dengan total dosis yang diberikan 36-42 Gy dilakukan dengan 6-7 fraksi pada rentang waktu 4-7 hari tiap fraksi. Sehingga untuk dosis 42 Gy sumber radiasi I-125 pada jumlah *seed* 29 diberikan sebanyak 7 fraksi dengan jumlah 4 *seed* tiap fraksinya

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang telah dipaparkan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa *Phantom* ORNL-MIRD 1996 yang digunakan pada simulasi pengobatan brakiterapi kanker paru-paru dapat menghasilkan simulasi yang maksimal, dikarenakan bentuk *phantom* sangat menyerupai bentuk tubuh manusia dan perbandingan jumlah *seed* isodosis untuk dosis serap optimal sebesar 42 Gy dari sumber radiasi I-125, Pd-103 dan Cs-131 dengan jumlah *seed* dan energi deposisinya berturut-turut 29 *seed*, 61 *seed*, dan 148 *seed*. Maka dari itu jumlah *seed* paling minimum untuk pengobatan kanker paru-paru kiri adalah pada sumber radionuklida I-125 dan sangat disarankan menggunakan sumber tersebut karena lebih optimal dan efektif daripada sumber radiasi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Deng, X., Wu, H., Gao, F., Su, Y., Li, Q., Liu, S. and Cai, J., 2017, "Brachytherapy in the treatment of breast cancer", *International Journal of Clinical Oncology*, Vol. 22 No. 4, pp. 641–650, doi: 10.1007/s10147-017-1155-5.
- Fitriatuzzakkiyyah, N., Sinuraya, R.K. and Puspitasari, I.M., 2017, "Cancer Therapy with Radiation: The Basic Concept of Radiotherapy and Its Development in Indonesia", *Indonesian Journal of Clinical Pharmacy*, Vol. 6 No. 4, pp. 311–320, doi: 10.15416/ijcp.2017.6.4.311.
- Gray, T., Bassiri, N., Kirby, N., Stathakis, S. and Mayer, K.M., 2020, "Implementation of a simple clinical linear accelerator beam model in MCNP6 and comparison with measured beam characteristics", *Applied Radiation and Isotopes*, Elsevier Ltd, Vol. 155, p. 108925, doi: 10.1016/j.apradiso.2019.108925.
- Joseph, J. and Rotty, L.W.A., 2020, "Kanker Paru: Laporan Kasus", *Medical Scope Journal*, Vol. 2 No. 1, pp. 17–25, doi: 10.35790/msj.2.1.2020.31108.
- Kasmudin, 2017, "Analisis karakteristik beberapa sumber radiasi gamma untuk brakhiterapi dengan menggunakan MCNP6", *Prosiding Seminar Nasional Pemanfaatan Teknologi Nuklir*, Vol. 51 No. November, pp. 101–109.
- Kristiyanti and Karyanta, E., 2014, "Analisis Dosis Radiasi Pada Kolam Air Iradiator Gamma 2 MCi Menggunakan MCNP", Vol. 11 No. 4, pp. 1–7.
- Kurniawan, F.A.D., 2021, *Penentuan Sumber Radionuklida Untuk Brakiterapi Pankreas Dengan Mempertimbangkan Efektifitas Dosis Yang Diberikan Menggunakan Software Mcnpx*, Universitas Diponegoro.
- Malaka, M., 2019, "Dampak Radiasi Radioaktif Terhadap Kesehatan", *Foramadiahi*, Vol. 11 No. 2, pp. 199–211.
- Putra, M.R., Milvita, D. and Prasetyo, H., 2015, "Karakterisasi Dosimetri Sumber Brakiterapi Ir-192 Menggunakan Metode Absolut", *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 4 No. 2, pp. 129–135.
- Saptiama, I., Moch, S., Pujiyanto, A., Lubis, H. and Setiawan, H., 2014, "Permanent Seed Implant Dosimetry (Psid)TM Versi 4 . 5 Sebagai Program Isodosis Dan Treatment Planning System (Tps)", Vol. 17 No. 1, pp. 7–14.
- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R.L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A. and Bray, F., 2021, "Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries", *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, Vol. 71 No. 3, pp. 209–249, doi: 10.3322/caac.21660.
- Susila, A. and Satmoko, A., 2010, "Perekayasaan Brachytherapy Medium Doserate Untuk Terapi Kanker Servik", Vol. 05 No. 1978, pp. 102–108.
- Ubaidillah, F.A., 2021, *Analisis Penentuan Jumlah Seed Brakhiterapi Paru-Paru Dengan Sumber Radiasi Pd-103, Cs-131, Dan i-125 Menggunakan Metode Monte Carlo*, Universitas Diponegoro.
- Werner, C.J., Armstrong, J., Brown, F.B., Bull, J.S., Casswell, L., Cox, L.J., Dixon, D., *et al*, 2017, "MCNP User's Manual Code Version 6.2", *Los Alamos National Laboratory*, p. 746.
- Yahya, A., Fisika, D., Matematika, F., Ilmu, D.A.N., Alam, P. and Hasanuddin, U., 2018, *Simulasi Distribusi Fluks Radiasi Dari Brakiterapi Untuk Kasus Breast Cancer Dengan Menggunakan Program Aplikasi SCILAB*, Universitas Hasanuddin.