

## Evaluasi Dosis Efektif *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) Pada Pengobatan *Glioblastoma Multiforme* Menggunakan Simulasi Monte Carlo

Liska Tri Handayani<sup>1</sup>, Wahyu Setia Budi<sup>1</sup>, Fajar Arianto<sup>1,\*</sup>

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

### Info Artikel

#### Histori Artikel:

Diajukan: 15 Mei 2023  
Direvisi: 7 Juni 2023  
Diterima: 26 Juli 2023

#### Kata kunci:

BNCT  
Dosis efektif  
Glioblastoma Multiforme  
ICRP  
MCNPX

#### Keywords:

BNCT  
Effective dose  
Glioblastoma Multiforme  
ICRP  
MCNPX

#### Penulis Korespondensi:

Fajar Arianto  
Email:  
[fajararianto@fisika.fsm.undip.ac.id](mailto:fajararianto@fisika.fsm.undip.ac.id)

### ABSTRAK

*Glioblastoma multiforme* merupakan kanker otak stadium IV yang sangat sulit diobati dan umumnya terjadi pada *hemisfer* serebrum otak. Terapi BNCT telah dikembangkan untuk pengobatan *glioblastoma* yang lebih aman, namun hamburan neutron dan foton gamma yang berasal dari terapi pada *organ at risk* ini perlu dievaluasi menggunakan simulasi. Metode yang dilakukan dengan mensimulasikan phantom ORNL-MIRD bagian kepala dan leher menggunakan program MCNPX. Arah penyinaran radiasi terhadap pasien dibuat menjadi dua arah yaitu RLAT (*Right Lateral*) dan TOP. Perhitungan dosis dalam BNCT dilakukan dengan mencari nilai dosis serap, dosis ekuivalen, dan dosis efektif. Dosis efektif dianalisis menggunakan ICRP publikasi 60 dan 103. Berdasarkan perhitungan dosis serap, arah penyinaran yang paling efektif adalah arah penyinaran TOP, dengan persentase dosis serap pada *organ at risk* relatif aman terutama pada organ tiroid, dan nilai pada organ *cranium*, otak, tiroid, dan kulit berturut-turut sebesar 11,4%, 10,15%, 0,002%, dan 6,4%. Nilai dosis efektif pada ICRP 60 dan 103 bernilai sama pada organ *cranium* dan kulit. Namun, pada organ tiroid, nilai dosis efektif dengan ICRP 103 lebih rendah dibandingkan ICRP 60. Hal ini menandakan berkurangnya resiko untuk penyakit terwaris pada tiroid, dan pada organ otak hanya dihitung menggunakan ICRP 103.

*Glioblastoma multiforme* is a stage IV brain cancer that is very difficult to treat and generally occurs in the cerebral hemispheres of the brain. BNCT therapy has been developed for the safer treatment of glioblastoma, but the scattering of neutrons and gamma photons originating from this therapy in organs at risk needs to be evaluated using simulation. The method was carried out by simulating the ORNL-MIRD phantom of the head and neck using the MCNPX program. The direction of radiation irradiation to the patient is made into two directions, namely RLAT (*Right Lateral*) and Top. Calculation of dose in BNCT is done by looking for the value of absorbed dose, equivalent dose, and effective dose. The effective dose was analyzed using ICRP publications 60 and 103. Based on the calculation of the absorbed dose, the most effective irradiation direction was the TOP irradiation direction, with the percentage of absorbed dose in organs at risk is relatively safe, especially in the thyroid organ with values in the cranium, brain, thyroid, and skin organs, respectively 11.4%, 10.15%, 0.002%, and 6.4%. The effective dose values at ICRP 30 is lower than ICRP 60. This indicates a reduced risk for inherited diseases of the thyroid, and in the brain, it is only calculated using ICRP 103.

Copyright © 2023 Author(s). All rights reserved

## I. PENDAHULUAN

Kanker otak *glioma* merupakan kanker otak yang paling sering terjadi dengan angka kejadian mencapai 51% dibandingkan kanker otak primer lainnya (Hasan & Sekarutami, 2014). *Glioma* memiliki beberapa jenis salah satunya adalah *glioblastoma multiforme*. *Glioblastoma multiforme* yaitu tipe tumor primer pada otak yang berasal dari sel glial dan merupakan salah satu tumor sistem saraf pusat yang diklasifikasikan sebagai *High grade glioma* (HGG) *grade IV*. Pada *grade* ini, kanker otak sulit untuk diterapi, karena pertumbuhan tumor yang terjadi sangat cepat dan ganas, serta dapat menyebar ke jaringan sehat di sekitarnya (Raharjo & Supriana, 2018).

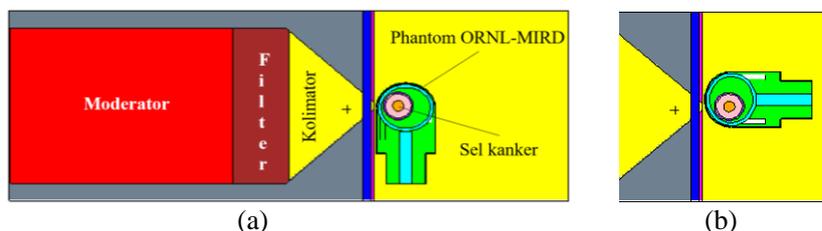
Metode penanganan kanker otak saat ini antara lain: Radioterapi, Kemoterapi, dan Operasi pembedahan. Pada pengobatan *glioblastoma multiforme* telah dikembangkan terapi yang lebih aman dan efektif. *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) merupakan metode penyembuhan kanker dengan memanfaatkan reaksi tangkapan neutron termal oleh inti  $^{10}\text{B}$  (Dea & Novitasari, 2016). Pengobatan BNCT dilakukan dengan menginjeksikan agen pembawa  $^{10}\text{B}$  ke sel kanker, kemudian diiradiasi berkas neutron. Reaksi tersebut menghasilkan partikel  $\alpha$  dan inti  $^7\text{Li}$ , partikel  $\alpha$  inilah yang digunakan untuk membunuh sel kanker (Ramadhani dkk., 2020). Berdasarkan studi klinis yang dilakukan di Universitas Tsukuba Jepang, metode BNCT dapat memperpanjang kelangsungan hidup hingga 2-3 kali lipat dibandingkan pengobatan Radioterapi (Matsumoto dkk., 2021).

Kelompok metode BNCT adalah dosis yang diterima jaringan terlokalisasi dan senyawa boron pada konsentrasi tertentu tidak merusak sel normal di sekitar jaringan kanker (Ramadhani dkk., 2020). Namun, jaringan sehat disekitar kanker yang terkena efek iradiasi neutron dengan  $^{10}\text{B}$  perlu dievaluasi nilai dosis yang tersimpan dalam jaringan tersebut. Hamburan neutron dan sinar gamma energi tinggi yang diinduksikan dalam tubuh manusia adalah penyebab utama dosis yang terdeposit dalam organ (Wang dkk., 2014).

Dalam penelitian ini akan menghitung nilai dosis serap, dosis ekuivalen dan dosis efektif pada jaringan sehat di sekitar kanker. Dosis efektif kemudian akan dianalisis menggunakan ICRP 60 dan 103. Hal ini dikarenakan terdapat perubahan sistem proteksi radiasi, nilai faktor bobot radiasi dan faktor bobot jaringan. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah Monte Carlo dengan program MCNPX. Program ini digunakan untuk mensimulasikan jejak partikel neutron di dalam phantom ORNL-MIRD.

## II. METODE

Pada penelitian ini program MCNPX digunakan untuk mensimulasikan fluks neutron dalam jaringan sehat di sekitar kanker. Pemodelan dilakukan dengan membuat sumber neutron, phantom bagian kepala, dan geometri kanker. Sumber neutron yang digunakan berasal dari pemodelan kolimator dari Reaktor Riset Kartini. Organ tubuh dimodelkan menggunakan phantom ORNL-MIRD bagian kepala dan leher, kemudian dimodifikasi dengan geometri jaringan kanker berbentuk bola yang terdiri *Gross Tumor Volume* (GTV) dengan diameter 3 cm, *Clinical Target Volume* (CTV) jari-jari 2 cm, dan jari-jari *Planning Target Volume* (PTV) sebesar 0,5 cm. Geometri jaringan kanker diletakan pada samping kanan lobus temporal. Konsentrasi boron yang disimulasikan pada penelitian ini sebesar  $30\mu\text{g/g}$  jaringan kanker. Ilustrasi simulasi BNCT pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 1.



**Gambar 1** Desain Kolimator beserta Phantom (a) RLAT (b) TOP

Pada penelitian ini arah penyinaran radiasi neutron terhadap phantom dibuat menjadi 2 arah yaitu arah penyinaran RLAT atau dari samping kanan phantom dan arah penyinaran TOP yaitu dari ujung kepala phantom. Tally yang digunakan yaitu tally 4 untuk menghitung fluks rata-rata pada sebuah sel.

Keluaran dari program MCNPX menghasilkan fluks neutron, laju dosis neutron, dan laju dosis gamma. Selanjutnya, fluks neutron akan digunakan dalam perhitungan nilai laju dosis alfa, laju dosis gamma dan laju dosis proton. Laju dosis didapatkan dari interaksi neutron dengan material dalam tubuh.

## 2.1 Laju Dosis Alfa

Laju dosis alfa sebelumnya diperoleh dari hasil reaksi antara neutron termal dan boron-10, dengan energi rerata 2,33 MeV Laju dosis alfa ditentukan dari persamaan berikut (Tesalonika dkk., 2016):

$$\dot{D}_{\text{alfa}} = \frac{\Phi N_{B10-jaringan} \sigma_{a,B10} Q \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J / MeV}}{1 \frac{\text{J / kg}}{\text{Gy}}} \quad (1)$$

Dengan  $\dot{D}$  adalah laju dosis (Gy/s),  $N_{B10-jaringan}$  merupakan jumlah atom per kg jaringan (atom/kg jaringan), dan  $\sigma_a$  adalahampang lintang serapan mikroskopik ( $\text{cm}^2$ ).

## 2.2 Laju Dosis Gamma

Reaksi yang terjadi antara hidrogen-1 di jaringan tubuh dan neutron epitermal, dan dihasilkan energi gamma sebesar 2,33 MeV. Laju pembentukan gamma selanjutnya dihitung menggunakan persamaan berikut (Tesalonika dkk., 2016):

$$\ddot{R} = \Phi \cdot N_{H-jaringan} \cdot \sigma_H \quad (2)$$

Untuk mencari laju dosis gamma, diperlukan nilai fraksi dosis serap gamma yang merupakan koefisien yang dosis yang diterima jaringan dari energi radiasi gamma tertentu. Perhitungan laju dosis gamma pada jaringan menggunakan persamaan berikut :

$$\dot{D}_\gamma = \ddot{R} \Delta \phi \quad (3)$$

Dengan  $\ddot{R}$  merupakan laju pembentukan Hidrogen-2 atau laju pelepasan gamma (foton/kg.s =Bq/ kg),  $\Phi$  adalah fluks neutron termal (neutron.cm<sup>-2</sup>.detik<sup>-1</sup>),  $\Delta$  adalah koefisien laju dosis serap atau aktivitas spesifik dengan nilai  $3,568 \times 10^{-13} \frac{\text{Gy/s}}{\text{Bq/kg}}$ , dan  $\phi$  adalah fraksi dosis serap gamma.

## 2.3 Laju Dosis Proton

Laju dosis proton diperoleh dari reaksi tangkapan neutron termal dengan <sup>14</sup>N dan menghasilkan karbon-14 serta proton dengan energi 0,66 MeV. Laju dosis proton dihitung menggunakan persamaan berikut (Tesalonika dkk., 2016):

$$\dot{D}_{\text{proton}} = \frac{\Phi N_{N-jaringan} \sigma_{a,N} Q \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J / MeV}}{1 \frac{\text{J / kg}}{\text{Gy}}} \quad (4)$$

## 2.4 Laju Dosis Total

Laju dosis total yaitu terdiri dari jumlah laju dosis pada tiap-tiap sumber dikali dengan faktor kualitas radiasi dari sumber radiasi tersebut. Faktor kualitas radiasi ditampilkan pada **Tabel 1**. Laju dosis total ditentukan sesuai persamaan berikut (IAEA, 2001):

$$\dot{D}_{\text{total}} = (\dot{D}_{\text{alfa}} \times W_{\text{alfa}}) + (\dot{D}_{\text{p}} \times W_{\text{proton}}) + (\dot{D}_{\text{neutron}} \times W_{\text{neutron}}) + (\dot{D}_{\gamma} \times W_{\gamma}) \quad (5)$$

Dosis yang diserap oleh tubuh perlu dikalkulasi menggunakan suatu besaran dosis serap total. Dosis serap pada penelitian ini dihitung menggunakan nilai laju dosis total dikali dengan lamanya waktu iradiasi.

$$D = \dot{D}_{\text{total}} \times t \quad (6)$$

$$t = \frac{44\text{Gy}}{\dot{D}_{\text{total}}} \quad (7)$$

**Tabel 1.** Faktor Kualitas Radisi (Ardana dkk, 2019)

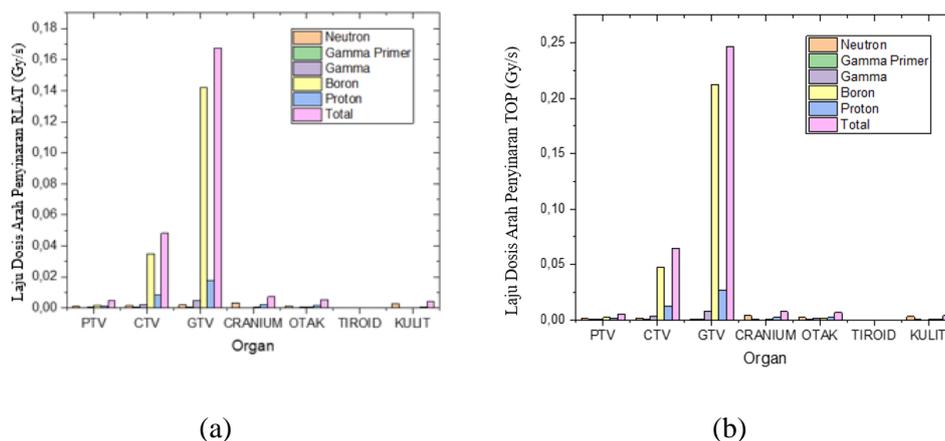
Radiasi	Faktor kualitas radiasi
Alfa	3,8 (tumor) 1,3 (jaringan sehat)
Proton	3,2
Neutron hamburan	3,2
Gamma	1

Pada penyembuhan histopatologi *glioblastoma multiforme*, dosis minimum yang optimal untuk CTV yaitu sebesar 44 Gy (Kageji dkk., 2014). Dosis serap kemudian digunakan dalam perhitungan dosis ekuivalen dan dosis efektif. Dosis efektif akan dianalisis menggunakan ICRP publikasi 60 dan publikasi 103.

### III. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Laju Dosis

Laju dosis serap total pada BNCT terdiri dari laju dosis neutron, laju dosis gamma, laju dosis boron, dan laju dosis proton. Nilai laju dosis yang dihasilkan penelitian ini dibuat dalam grafik sesuai **Gambar 2**.



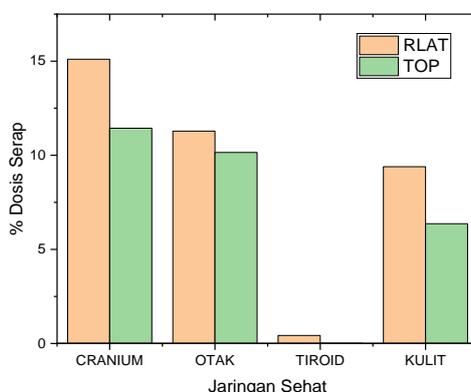
**Gambar 2** Grafik Laju Dosis Serap pada jaringan. (a) arah penyinaran RLAT, (b) arah penyinaran TOP

Pada Gambar 2, menunjukkan nilai laju dosis serap terhadap jaringan kanker dan organ sehat di sekitar kanker. Nilai laju dosis total tertinggi berada pada jaringan GTV dan CTV yang merupakan jaringan kanker. Untuk jaringan PTV memiliki nilai laju dosis total jauh lebih kecil dibandingkan dengan GTV, karena pada PTV disimulasikan memiliki komposisi penyusun jaringan yang sama dengan jaringan sehat. Pada jaringan CTV dan GTV, nilai laju dosis boron memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan laju dosis neutron, gamma, maupun proton. Hal tersebut menunjukkan dosis boron mendominasi pada terapi BNCT, karena interaksi neutron termal dengan boron-10 menghasilkan alfa dan lithium yang memiliki sifat merusak sehingga diharapkan dapat merusak jaringan kanker. Pada grafik diatas terlihat bahwa dosis boron ini hanya terkonsentrasi pada jaringan kanker GTV dan CTV, sehingga membuktikan bahwa terapi BNCT ini bersifat selektif.

#### 3.2 Perhitungan Dosis

Dosis serap pada penelitian ini didapatkan dari perkalian laju dosis serap dengan waktu iradiasi. Waktu yang dibutuhkan untuk iradiasi kepala adalah 15,2 menit untuk arah penyinaran RLAT, dan 11,33 menit untuk arah penyinaran TOP. Untuk mencapai penyembuhan hispatologi *glioblastoma multiforme* dilokasi utama CTV adalah 44 Gy, maka akan dihitung persentase dosis yang diterima oleh jaringan sehat disekitar kanker pada kedua arah penyinaran. Besarnya persentase dosis yang diterima oleh organ terdekat dari organ target direlatifkan sehingga persentase dosis serap dari jaringan kanker sebesar 100% untuk setiap arah penyinaran radiasi yang berbeda. Besarnya dosis yang diterima oleh organ terdekat dari organ

target harus kurang dari 75%. Hasil perhitungan dosis serap pada jaringan sehat disekitar kanker dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3** Grafik Persentase Dosis pada jaringan sehat

Pada Gambar 3, persentase dosis serap arah RLAT pada organ *cranium*, otak, tiroid dan kulit berturut-turut yaitu 15,1%, 11,3%, 0,4%, dan 9,4%. Kemudian untuk penyinaran TOP berturut-turut 11,4%, 10,15%, 0,002%, dan 6,4%. Persentase dosis serap rata-rata pada jaringan sehat arah penyinaran iradiasi RLAT lebih tinggi dibandingkan arah penyinaran iradiasi TOP. Hal ini disebabkan karena perbedaan posisi sumber terhadap organ sehingga timbul perbedaan jarak kedalaman organ terhadap sumber radiasi. Semakin dalam organ dari sumber radiasi, maka semakin panjang lintasan neutron berinteraksi dengan organ tersebut, sehingga pada arah penyinaran TOP persentase dosis serap tiroid jauh lebih kecil dibandingkan arah penyinaran RLAT.

Dosis ekuivalen merupakan dosis serap rata-rata dari radiasi pada organ atau jaringan. Nilai dosis ekuivalen dipengaruhi oleh faktor bobot radiasi yang diberikan oleh ICRP berdasarkan data radiologik yang dievaluasi dari waktu ke waktu. Faktor bobot jaringan menunjukkan ketika semakin tinggi ( $W_R$ ), maka semakin tinggi tingkat kerusakan biologi yang ditimbulkannya. Hasil perhitungan dosis ekuivalen pada jaringan sehat ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2** Dosis ekuivalen pada jaringan sehat

Organ/ jaringan	Dosis Ekuivalen (Sv)							
	Neutron $W_R=W_R(E)$		Gamma $W_R=1$		Boron $W_R= 20$		Total	
	RLAT	TOP	RLAT	TOP	RLAT	TOP	RLAT	TOP
<i>Cranium</i>	1,662E+02	1,258E+02	6,647E+00	5,032E+00	1,329E+02	1,006E+02	3,057E+02	2,315E+02
Otak	1,241E+02	1,117E+02	4,965E+00	4,467E+00	9,929E+01	8,934E+01	2,284E+02	2,055E+02
Tiroid	4,665E+00	2,867E-02	1,866E-01	1,147E-03	3,732E+00	2,294E-02	8,584E+00	5,275E-02
Kulit	1,033E+02	6,999E+01	4,132E+00	2,800E+00	8,265E+01	5,599E+01	1,901E+02	1,288E+02

Dosis efektif digunakan untuk mengkaji hubungan dosis dengan resiko kesehatan akibat penyerapan energi pada suatu organ atau jaringan. Dosis efektif juga didefinisikan sebagai jumlah dosis tara pada setiap organ atau jaringan, dengan memberikan nilai faktor bobot jaringan ( $W_T$ ). Pada penelitian ini nilai dosis efektif akan dianalisis menggunakan ICRP pada publikasi 60 (1991) dan publikasi 103 (2007), hal ini dikarenakan adanya perubahan nilai faktor bobot jaringan pada beberapa organ atau jaringan. Nilai dosis efektif yang dihasilkan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3** Dosis Efektif pada Jaringan Sehat

Organ	Dosis Efektif (Sv)			
	ICRP Publikasi 60		ICRP Publikasi 103	
	RLAT	TOP	RLAT	TOP
<i>Cranium</i>	3,057	2,315	3,057	2,315
Otak	-	-	2,284	2,055
Tiroid	0,429	0,003	0,343	0,002
Kulit	1,901	1,288	1,901	1,288

Berdasarkan arah penyinaran radiasi terhadap tubuh, nilai dosis efektif arah penyinaran TOP cenderung lebih rendah dibandingkan arah penyinaran RLAT. Nilai dosis efektif arah penyinaran RLAT pada jaringan sehat *cranium*, otak, tiroid dan, kulit berturut-turut ialah 32%, 11%, 17050%, dan 47% lebih tinggi dibanding arah penyinaran TOP. Semakin kecil nilai dosis efektifnya, semakin kecil pula resiko kesehatan yang diakibatkan penyerapan energi pada organ tersebut sehingga pada penelitian ini arah penyinaran TOP merupakan pemilihan yang tepat dan efektif dalam mengobati kanker *glioblastoma multiforme* dalam kasus ini.

### 3.3 Efek Radiasi Terhadap Tubuh

Jaringan sehat yang menerima dosis serap seperti organ tiroid dan jaringan kulit mungkin terjadi efek deterministik karena organ tersebut memiliki dosis ambang (Clement dkk., 2012). Efek deterministik pada organ kulit antara lain Eritema (kemerahan) pada rentang dosis 2-3 Gy, Deskuamasi kering pada 3-8 Gy, Deskuamasi basah (bernanah) pada 12-20 Gy, hingga kematian jaringan jika dosis lebih dari 20 Gy. Pada organ tiroid saat dosis ambang melebihi 5 Gy memungkinkan terjadinya Hipotiroidisme, dan pada lensa efek radiasi yang mungkin timbul yaitu katarak dengan dosis ambang 0,5 Gy, untuk LET rendah 2-10 Gy dan 1-2 Gy untuk LET tinggi (BAPETEN, 2010). Dosis yang diterima organ kulit, tiroid dan lensa mata berdasarkan arah penyinaran RLAT sebesar 4,132 Gy, 0,187 Gy, dan 4,965 Gy, sedangkan arah penyinaran TOP sebesar 2,8 Gy, 0,001 Gy, dan 4,467 Gy.

Pada penelitian ini efek deterministik yang diperkirakan terjadi pada organ kulit dengan arah iradiasi RLAT adalah deskuamasi kering, dan pada arah iradiasi TOP efek yang terjadi yaitu eritema. Sedangkan pada organ tiroid diperkirakan tidak terjadi efek deterministik, karena nilai dosis serap nya di bawah ambang batas dosis. Pada lensa mata, efek deterministik yang terjadi adalah katarak, karena nilai dosis serap mata yang sebanding dengan dosis serap pada otak melebihi ambang batas dosis. Selain efek deterministik, efek stokastik juga dapat terjadi pada penelitian ini.

## IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa arah penyinaran radiasi terhadap tubuh yang efektif untuk pengobatan kanker *glioblastoma multiforme* menggunakan BNCT yaitu pada arah penyinaran radiasi TOP, dengan persentase dosis serap pada organ *cranium*, otak, tiroid, dan kulit berturut-turut sebesar 11,4%, 10,15%, 0,002%, dan 6,4%. Serta waktu penyinaran yang dibutuhkan selama 11,33 menit. Dosis efektif pada jaringan sehat di sekitar kanker yang dievaluasi menggunakan ICRP publikasi 60 dan publikasi 103 menghasilkan nilai dosis efektif yang sama untuk organ *cranium* dan kulit. Namun pada organ tiroid nilai dosis efektif dengan ICRP terbaru yaitu publikasi 103 lebih rendah dibanding publikasi 60, hal ini menandakan berkurangnya resiko untuk penyakit terwaris pada tiroid. Efek deterministik yang terjadi akibat penyerapan dosis serap yang melebihi ambang batas dosis pada jaringan sehat di sekitar kanker *glioblastoma multiforme* yaitu terjadi pada jaringan kulit dan lensa mata. Dengan perkiraan efek pada kulit dengan arah penyinaran RLAT berupa deskuamasi kering, dan efek pada arah penyinaran TOP berupa eritema atau kemerahan pada kulit, dan pada organ lensa mata, efek deterministik yang diperkirakan terjadi adalah katarak. Selain efek deterministik, efek stokastik juga mungkin terjadi pada pengobatan menggunakan BNCT.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dekan Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro yang telah memberi fasilitas peralatan komputer melalui hibah sumber dana selain APBN.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ardana, I. M., Noerwasana, A. D., & Sardjono, Y. (2019). Kajian Teknologi Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) dan Aspek Regulasinya. *OAI4*, 95–101.
- BAPETEN. (2010). Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2010 Tentang Pemantauan Kesehatan Untuk Pekerja Radiasi. *Jdih.Bapeten.Go.Id*.
- Clement, C. H., Stewart, F. A., Akleyev, A. V., Hauer-Jensen, M., Hendry, J. H., Kleiman, N. J., Macvittie, T. J., Aleman, B. M., Edgar, A. B., Mabuchi, K., Muirhead, C. R., Shore, R. E., & Wallace, W. H. (2012). ICRP publication 118: ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. *Annals of the ICRP*, 41(1–2), 1–322. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.02.001>
- Dea, P., & Novitasari, D. (2016). Perhitungan Dosis Foton Yang Diterima Pekerja Radiasi dan Pasien Pada Kasus Terapi BNCT Kanker Otak Menggunakan Kode MCNPX. *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir*, 1–5.
- Hasan, I., & Sekarutami, S. M. (2014). Standar Pengobatan Glioblastoma Multiforme. *Radioterapi & Onkologi Indonesia*, 5(2), 51–60.
- IAEA. (2001). Current Status of neutron capture therapy. *IAEA, 2001 (8), May*, 75–77.
- ICRP. (1991). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 60*, 21, 1–3. [https://doi.org/10.1016/0146-6453\(81\)90127-5](https://doi.org/10.1016/0146-6453(81)90127-5)
- ICRP. (2007). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 103*, 37(2–4), 1–332. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
- Kageji, T., Mizobuchi, Y., Nagahiro, S., Nakagawa, Y., & Kumada, H. (2014). Correlation between radiation dose and histopathological findings in patients with glioblastoma treated with boron neutron capture therapy (BNCT). *Applied Radiation and Isotopes*, 88, 20–22. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.12.014>
- Matsumoto, Y., Fukumitsu, N., Ishikawa, H., Nakai, K., & Sakurai, H. (2021). A critical review of radiation therapy: From particle beam therapy (proton, carbon, and BNCT) to beyond. *Journal of Personalized Medicine*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/jpm11080825>
- Raharjo, F. B., & Supriana, N. (2018). Perbandingan Protokol Terapi Radiasi pada Glioblastoma Multiforme. *Radioterapi & Onkologi Indonesia*, 8(1), 50–63. <https://doi.org/10.32532/jori.v8i1.61>
- Ramadhani, A. D. P., Susilo, S., Nurfatthan, I., Sardjono, Y., Widarto, W., Wijaya, G. S., & Triatmoko, I. M. (2020). Dose Estimation of the BNCT Water Phantom Based on MCNPX Computer Code Simulation. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 22(1), 23. <https://doi.org/10.17146/tdm.2020.22.1.5780>
- Tesalonika, A., Harto, A. W., Sardjono, Y., & Triatmoko, I. M. (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 Applications*, 1(2), 63. <https://doi.org/10.24246/ijpna.v1i2.63-72>
- Wang, J. N., Lee, K. W., & Jiang, S. H. (2014). Effective dose evaluation for BNCT brain tumor treatment based on voxel phantoms. *Applied Radiation and Isotopes*, 88, 55–58. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.12.012>