

DOSIMETRI BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY DENGAN VARIASI PROYEKSI PADA TRANSVERSE COLON CANCER (TCC) MENGGUNAKAN PHITS

Sarika Setya Putri¹, Yohanes Sardjono² dan Mochammad Rafli Irwan³

¹Radiologi, STIKES Guna Bangsa, Jl. Ring Road Utara, Sleman, 55283, Indonesia

²Badan Riset dan Inovasi Negara, Jl Babarsari, Sleman, 55281, Indonesia

³PT United Tractors, Jl. Raya Bekasi, Jakarta Timur, 13910, Indonesia

E-mail: sarikaputri@gunabangsa.ac.id

Abstrak

Transverse Colon Cancer (TCC) merupakan jenis kanker yang menyerang salah satu pars pada Colon, pasien dengan klinis TCC memiliki kualitas hidup yang rendah akibat resiko yang ditimbulkan. Sehingga dibutuhkan treatment yang optimal yang mampu menghentikan metastasis sel kanker, namun memiliki efek samping minimal pada jaringan lainnya. Treatment BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) dengan metode selective targeting diklaim mampu memberikan justifikasi pasien yang tinggi, namun dibutuhkan proyeksi yang paling optimal untuk memastikan dosis terdistribusi efektif pada sel kanker. Dalam hal ini kolimator harus dijaga sedekat mungkin, karena fluks neutron termal sangat berkurang seiring jarak dari kolimator meningkat. Evaluasi Planning treatment BNCT secara komputasional dilakukan menggunakan Particle and Heavy Ion Code Transport System (PHITS) versi 3.30, untuk mengetahui dosimetri pada voxel phantom abdomen, yang divariasikan menjadi empat proyeksi yaitu LLD AP (Left Lateral Decubitus Antero-Posterior), LLD PA (Left Lateral Decubitus Postero-Anterior), Lateral Dextra dan Lateral Sinistra. Berdasarkan hasil simulasi dan evaluasi dipastikan bahwa, dosis dan waktu iradiasi yang diperiksa dalam transverse colon berkurang secara signifikan dalam proyeksi LLD AP lebih efektif diterapkan untuk TCC.

Kata kunci: TCC; BNCT; PHITS

Abstract

Transverse Colon Cancer (TCC) is a type of cancer that attacks one of the pars of Colon, patients with TCC clinically have a low quality of life due to the risks caused. So that optimal treatment is needed that is able to stop the metastasis of cancer cells, but has minimal side effects on other tissues. BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) treatment with the selective targeting method is claimed to be able to provide high patient justification, but the most optimal projection is needed to ensure an effective dose distribution in cancer cells. In this case the collimator should be kept as close as possible, since the thermal neutron fluxes greatly decreases as the distance from the collimator increases. The evaluation of BNCT planning treatment was carried out computationally using the Particle and Heavy Ion Code Transport System (PHITS) version 3.30, to determine the dosymmetry of the abdominal phantom voxel, which was varied into four projections, namely LLD AP (Left Lateral Decubitus Antero-Posterior), LLD PA (Left Lateral Decubitus Postero-Anterior), Lateral Dextra and Lateral Sinistra. Based on the results of simulation and evaluation, it is confirmed that the dose and irradiation time examined in the transverse colon are significantly reduced in the projection of LLD AP is more effectively applied to TCC with a dose of 0.71 Gy.

Keywords: TCC; BNCT; PHITS

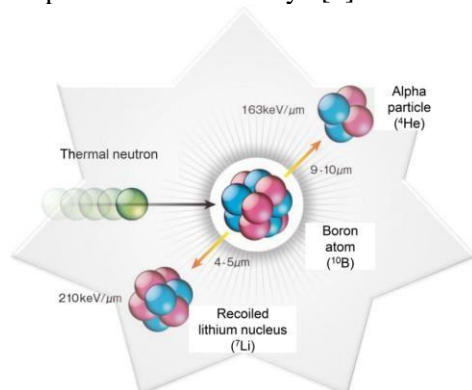
PENDAHULUAN

Transverse Colon merupakan satu dari enam pars dari colon atau usus besar, yang secara embriologis terletak pada 2/3 dari colon bagian tengah dan 1/3 dari colon belakang. Dengan demikian *Transverse Colon Cancer* (TCC), didefinisikan sebagai tumor yang

terletak di antara *distal hepatica flexure* dan *proksimal splenic flexure* [1]. TCC memiliki prevalensi kejadian terendah diantara seluruh kasus kanker yang terjadi pars lain pada colon, yaitu <10% dari total seluruh kasus *Colorectal Colon Cancer* (CRC) [2].

Treatment untuk pasien TCC yang paling sering digunakan adalah tindakan reseksi [3]. Namun, tindakan reseksi yang harusnya dilakukan menjadi sangat bahaya, karena TCC merupakan kanker dengan probabilitas metastasis ke kelenjar getah bening yang tinggi dan organ penting perifer mungkin menimbulkan lebih banyak bahaya [4]. Hal tersebut menjadi suatu tantangan dalam *treatment* kanker, dengan faktor resiko *treatment* yang tinggi. Maka, inovasi metode *selective targeting, treatment Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) muncul dengan klaim mampu menghentikan metastasis sel kanker, namun memiliki efek samping minimal bagi organ sehat sekitarnya. BNCT memiliki mekanisme yang menarik dengan menggabungkan prinsip dasar kemoterapi yang diterapkan dalam *treatment* radiasi [5].

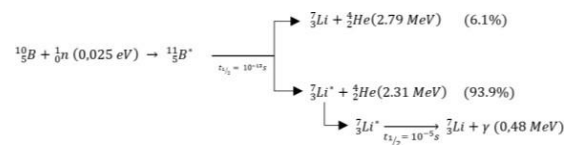
BNCT memanfaatkan interaksi atom boron (B^{10}) yang dikenal memiliki sifat menyerap neutron dengan probabilitas tinggi yang dikombinasikan neutron termal untuk menginvasi sel kanker [6]. Partikel alpha dan Li^7 yang merupakan hasil dari reaksi boron dan neutron memiliki daya ionisasi yang tinggi karena memiliki *Linear Energy Transfer* (LET) yang tinggi. Energi dari reaksi alpha dan Li^7 hanya dapat menempuh jarak $4 \mu m$ sampai dengan $10 \mu m$ [7], sedangkan diameter kanker berkisar antara $15 \mu m$ sampai dengan $25 \mu m$ [8]. Berdasarkan hal tersebut, energi partikel hanya akan terdeposisi dalam satu sel kanker tanpa merusak sel lainnya [9].



Gambar 1. Reaksi pada Boron Neutron Capture Therapy [7]

Pada Gambar 2 menunjukkan interaksi ^{10}B dengan neutron menghasilkan B^{11*} yang tidak stabil. Inti B^{11*} tersebut kemudian meluruh menjadi Li^7 dan alpha dengan energi

sebesar 2,79 MeV (6,1%) dan 2,31 MeV (93,9%) [10]. Waktu paruh B^{11*} untuk meluruh menjadi Li^7* dan alpha selama $10^{-13}s$, sedangkan Li^7* menjadi stabil setelah melepaskan sinar gamma dengan waktu $10^{-5}s$. Energi partikel alpha yang dilepaskan sebesar 1,48 MeV. Energi Li^7 yang dilepas sebesar 0,84 MeV yang sebagian besar interaksi menghasilkan inti Li^7 tidak stabil yang kemudian melepaskan foton berenergi 0,48 MeV untuk menjadi stabil [11].



Gambar 2. Interaksi $^{10}B(n,\alpha)^7Li$ [5]

Manfaat yang diberikan *treatment* BNCT tidak terlepas dari dosimetri yang dihasilkan dari interaksi B^{10} dengan neutron thermal [12], yang menghasilkan komponen dosis dari dosis alpha, proton, gamma, dan neutron. Saat proses *treatment* BNCT, tidak hanya tumor saja yang terpapar radiasi namun juga semua organ berpotensi mendapat radiasi akibat interaksi sekunder. Pada sel kanker yang menerima radiasi, kolimator harus dijaga sedekat mungkin, sehingga dosis *treatment* yang efektif dapat terdistribusi ke tumor, karena fluks neutron termal sangat berkurang seiring jarak dari kolimator meningkat [13]. Karena letak dari TCC sangat dekat dan saling berhubungan dengan beberapa organ yang radiosensitif. Hal tersebut menjadi pertimbangan diperlukannya suatu perhitungan dosis komponen dari OAR, untuk memastikan BNCT aman dan efektif untuk membunuh sel kanker [14].

Waktu iradiasi sangat ditentukan oleh besaran dosis boron yang terakumulasi pada sel kanker [9]. Mengingat dosis Boron yang diserap oleh organ tidak dapat diukur secara langsung maka diperlukan metode khusus untuk melakukan *planning* perhitungan dosis secara komputasi, yaitu metode *Monte Carlo* yang diterapkan pada program *Particle and Heavy Ion Transport Code System* (PHITS) [15].

Penelitian ini diharapkan bisa menganalisa proyeksi yang tepat untuk *Transverse Colon Cancer* pada *treatment* BNCT kasus *Colorectal Cancer* serta

memperoleh *mapping* dosimetri dari sel kanker dan organ sekitar sel kanker dengan simulasi PHITS versi 3.30.

METODE

Penelitian ini diawali dengan melakukan pembuatan simulasi berbasis *coding* MCNPX menggunakan *software transport* partikel PHITS versi 3.30 dengan membuat geometri target, geometri phantom voxel, dan geometri sumber neutron. Treatment BNCT dengan target TCC pada phantom voxel abdomen, dalam simulasi ini akan divariasikan menjadi empat proyeksi iradiasi yaitu *Left Lateral Decubitus AP*, *Left Lateral Decubitus PA*, *Lateral Dextra* dan *Lateral Sinistra*. Setelah dilakukan simulasi iradiasi, analisa dosimetri dilakukan untuk memperoleh proyeksi optimal untuk treatment BNCT kasus TCC.

Geometri sumber neutron dalam penelitian ini disimulasikan sebagai *Beam Shaping Assembly* (BSA) yang dikombinasikan dengan *cyclotron-based* BNCT 30 MeV dan arus 1,5 mA. Sumber proton yang berasal dari *cyclotron-based* BNCT 30 MeV dengan target berillium untuk menghasilkan neutron. Selanjutnya berkas neutron akan masuk ke dalam BSA untuk dimoderasi serta dipastikan bahwa radiasi yang sampai kedalam tubuh pasien hanya neutron epitermal. Simulasi pertama dilakukan untuk optimasi parameter BSA, sebanyak 150.000.000 partikel disimulasikan untuk diiradiasikan ke *water phantom* dan B^{10} berdimensi 10 x 10 cm yang distribusinya dianggap merata. Hal ini dimaksudkan untuk memastikan jika parameter output BSA sudah sesuai dengan rekomendasi dari IAEA seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter Berkas Neutron Rekomendasi IAEA

Parameter	Rekomendasi IAEA
$\phi_{epi}(n/cm^2s)$	$> 1,0 \times 10^9$
$D_{fast}/\phi_{epi}(Gy - cm^2/n)$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
$D_{\gamma}/\phi_{epi}(Gy - cm^2/n)$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Φ_{th}/Φ_{epi}	$< 0,05$
J/ϕ_{epi}	$> 0,7$

Geometri target dalam penelitian ini menggunakan *voxel phantom whole abdomen* dengan dimensi 480 x 300 x 246 mm dan visual *voxel* berukuran 2 x 2 mm. *Slice thickness* yang digunakan 3,2 mm sehingga

terdapat 36.000 *voxel* dalam satu *slice*. *Voxel phantom abdomen*, *Voxel phantom whole abdomen* terdiri dari beberapa sistem yang memiliki organ yang disimulasikan dalam *voxel phantom* sebanyak 15 organ meliputi *Colorectal*, *ovary*, *lymph node*, *skin*, *bone marrow*, *small intestine*, *spinal cord*, uterus, *spleen*, *gallbladder*, *bladder*, *renal*, *pancreas*, dan *gastric*.

Voxel phantom yang telah disusun ditambahkan jaringan TCC dengan stadium IV-A berukuran ± 3 dengan letak $x = 22,2 - 25,2$; $y = 10,4 - 12$; dan $z = 30,3 - 33,6$ Material dari sel kanker dapat dilihat pada tabel 2. Selanjutnya sel kanker diberikan input B^{10} yang diinjeksikan sebanyak 91% dari total distribusi. Simulasi sel kanker pada *voxel phantom* adalah T1, N1a, M1a dimana sel kanker sudah menginvasi submukosa dan satu *lymph node* regional positif serta telah terjadimetastasis dari TCC di organ diluar *cavum peritoneal*.

Tabel 2. Fraksi Massa Atom pada Kanker[16].

Atom	Kode PHITS	Fraksi Massa
H	1001	0,099
C	6012	0,269
N	7014	0,045
O	8016	0,569
P	15031	0,018

Analisa dosimetri pada treatment BNCT untuk TCC dengan variasi proyeksi, dimulai dengan proses *running* laju dosis serap yang diperoleh dari simulasi, hasil tersebut perlu dikali dengan faktor bobot radiasi untuk menghasilkan laju dosis isoeftif (\dot{D}_{ISOE}) yang mengindikasikan perbedaan efek biologis dari setiap jenis dosis radiasi.

Tabel 3. Nilai faktor bobot radiasi

Faktor Bobot	Nilai
ω_{γ}	1
ω_p	3,2
ω_n	3,2
ω_b	3,8 (jaringan tumor) 1,3 (jaringan sehat)

Untuk mendapatkan nilai laju dosis isoeftif (\dot{D}_{ISOE}) BNCT, faktor bobot masing-masing komposisi radiasi (tabel 3) perlu dikalikan dengan masing-masing dosis

serap dari setiap komposisi radiasi dari simulasi yaitu laju dosis serap gamma (\dot{D}_γ), laju dosis serap proton (\dot{D}_p), laju dosis serap neutron (\dot{D}_n) dan laju dosis serap boron (\dot{D}_b). Kemudian akan dijumlahkan, sesuai dengan persamaan berikut [17]:

$$D_{IsoE} = (\omega_\gamma \times D_\gamma) + (\omega_p \times D_p) + (\omega_n \times D_n) + (\omega_b \times D_b) \quad (1)$$

Perhitungan waktu iradiasi (t) selanjutnya akan digunakan untuk menghitung besaran dari dosis serap (D) dan dosis isoeftif (D_{IsoE}) setelah diketahui sebelumnya laju dosis serap (\dot{D}) dan laju dosis isoeftif (\dot{D}_{IsoE}). Waktu iradiasi (t) sendiri dapat dihitung menggunakan dosis maksimal dengan berpedoman pada dosis lethal sel kanker mati yaitu 50 mSv. Sehingga waktu yang digunakan untuk iradiasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$t = \frac{\text{Dosis maksimal}}{\text{Laju dosis efektif pada sel kanker}} \quad (2)$$

Dosis isoeftif digunakan untuk merujuk pada hubungan antara dosis serap dengan efek biologis yang diinduksi oleh dosis serap yang diterima setiap jaringan dan dihitung dengan mengalikan waktu iradiasi (t) dengan laju dosis isoeftif (\dot{D}_{IsoE}) masing-masing organ dan sel kanker dengan persamaan:

$$D_{IsoE} = t \times \sum D_{t/o} \quad (3)$$

Dari hasil simulasi menggunakan PHITS versi 3.30 akan diperoleh *mapping* dosis serap pada masing-masing organ yang divisualisasikan melalui gradasi warna setiap voxelnya. Hal tersebut menjadi dasar pengambilan kesimpulan proyeksi terbaik untuk pasien TCC dengan treatment BNCT selain dengan menggunakan analisis dosimetri

HASIL DAN PEMBAHASAN

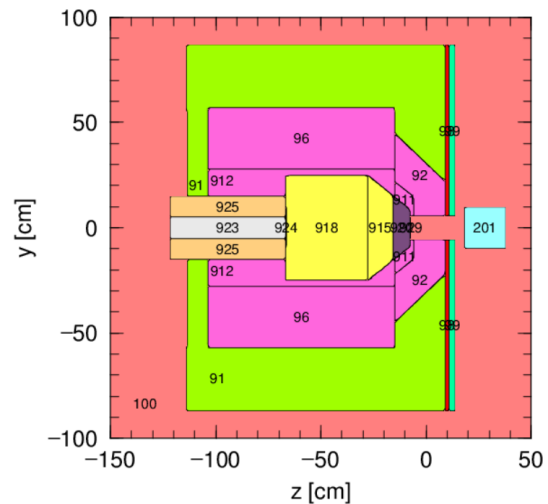
Geometri sumber neutron yang sudah disimulasikan menjadi *BSA* parameternya telah dioptimasi untuk menaikkan fluks neutron epitermal sebagai salah satu parameter *BSA*, menunjukkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Optimasi Parameter *BSA*

Parameter	Rekomendasi	Hasil
	IAEA	optimasi
$\phi_{epi}(n/cm^2s)$	$> 1,0 \times 10^9$	$2,33 \times 10^9$
$D_{fast}/\phi_{epi}(Gy - cm^2/n)$	$< 2,0 \times 10^{-13}$	$1,47 \times 10^{-14}$
$D_\gamma/\phi_{epi}(Gy - cm^2/n)$	$< 2,0 \times 10^{-13}$	$1,47 \times 10^{-13}$
Φ_{th}/ϕ_{epi}	$< 0,05$	0,041
J/ϕ_{epi}	$> 0,7$	0,708

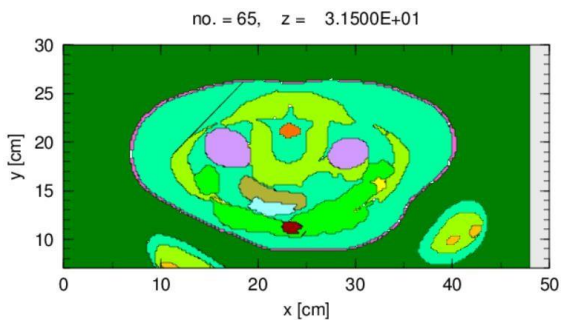
Hasil dari optimasi *Beam Shaping Assembly* sudah sesuai dengan rekomendasi IAEA, sehingga simulasi selanjutnya dapat dilanjutkan.

Sumber neutron yang digunakan adalah *cyclotron-based* BNCT 30 MeV sebagai sumber proton dengan target berillium untuk menghasilkan neutron (Gambar 3).



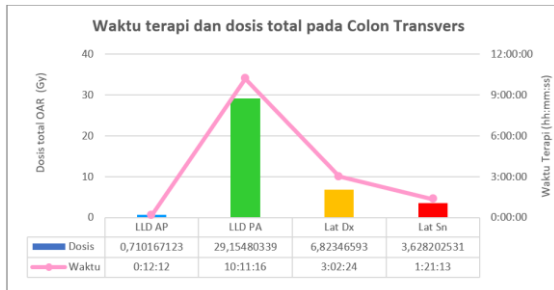
Gambar 3. Geometri *Voxel Phantom Abdomen*

Geometri voxel phantom yang telah ditambahkan geometri jaringan kanker TCC mendapatkan visualisasi sebanyak 75 slice. Sebagai *sample slice* ke 65 yang sejajar dengan TCC, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Geometri *Voxel Phantom Abdomen*

Analisa dosimetri pada treatment BNCT untuk TCC dengan variasi proyeksi LLD AP, LLD PA, Lateral Sinistra dan Lateral Dextra divisualisasikan pada Gambar 5.

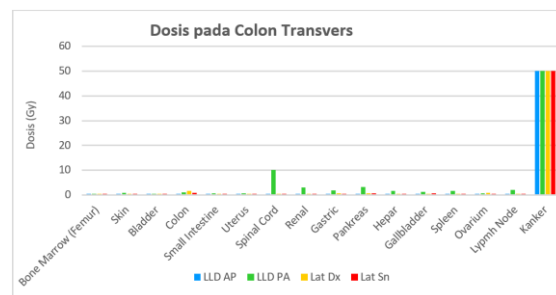


Gambar 5 Grafik waktu terapi dan dosis total pada empat variasi proyeksi

Terkait waktu *treatment* BNCT pada colon transverse, ditunjukkan bahwa pada proyeksi *Left Lateral Decubitus (Antero-Posterior)* merupakan proyeksi dengan waktu *treatment* paling singkat yaitu 12 menit 12 detik dan dosis isoeftif total paling rendah ($0,710 \pm 0,002$ Gy) dibandingkan dengan ketiga proyeksi lain. Hal ini dikarenakan secara anatomis colon transverse letaknya lebih *anterior* sehingga neutron termal yang diiradiasikan ke sel kanker yang sudah diinjeksikan boron memiliki peluang tinggi untuk berinteraksi di dalam sel kanker. Akibatnya tidak membutuhkan waktu yang lama untuk boron menginvasi sel kanker tersebut. Keadaan sebaliknya ditunjukkan oleh proyeksi LLD PA yang merupakan kebalikan dari proyeksi LLD AP dengan kedalaman kurang lebih 13 cm dari *skin*. $29,15 \pm 0,12$ Gy didapatkan jika pasien CRC pars transvers diiradiasi menggunakan proyeksi LLD PA dalam waktu 10 jam 11 menit 16 detik. Kedalaman antara *skin* dan sel kanker ini menyebabkan tingginya moderasi fluks neutron termal yang mengakibatkan minimumnya interaksi antara neutron dan Boron pada sel kanker, dengan demikian durasi *treatment* yang lama merupakan efek *clearance* dari Boron-10 yang akan terekskresi dalam waktu yang singkat namun cukup untuk melakukan iradisi kurang lebih 1-2 jam.

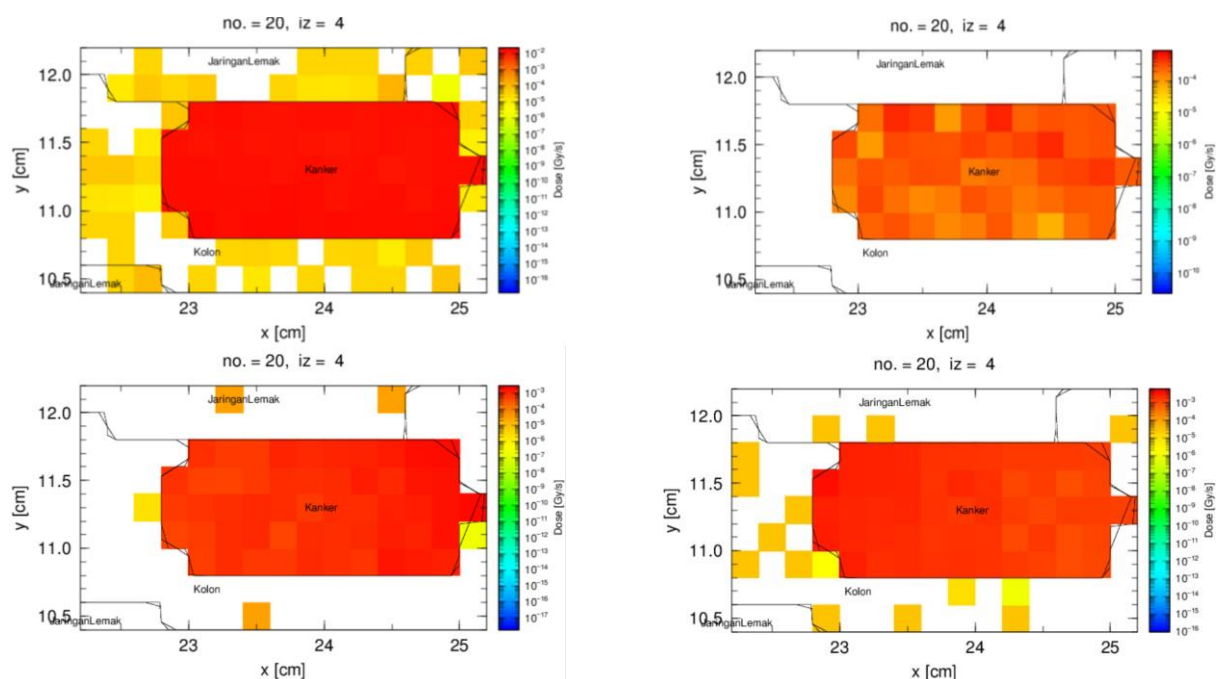
Dosis isoeftif BNCT dengan letak kanker pada pars colon transverse mayoritas telah terdeposisi pada sel kanker. Namun beberapa organ seperti *lymph node* (0,1 Gy), *ovary* (0,5 Gy) dan *spinal cord* (0,5 Gy) jika

ditinjau lebih lanjut melebihi nilai batas dosis. Proyeksi LLD AP merupakan proyeksi yang menghasilkan dosis selamat pada semua organ termasuk ketiga organ tersebut diatas *lymph node* sebesar $1,90E-2 \pm 1,29E-4$ Gy; *ovary* sebesar $1,11E-2 \pm 2,37E-4$ Gy dan *spinal cord* dengan dosis $4,55E-2 \pm 1,59E-4$ Gy yang tidak selamat pada proyeksi lainnya. Berbanding terbalik dengan proyeksi LLD PA, pada proyeksi ini ketiga organ tersebut diatas melampaui batas dosis. Pada proyeksi LLD PA OAR mengalami kondisi tidak selamat dengan dosis isoeftif sebesar $1,01E+1 \pm 3,03E-2$ Gy pada *spinal cord*; dan dua organ lainnya yaitu *lymph node* dan *ovary* ($5,71E-1 \pm 1,24E-2$ Gy dan $1,98E+0 \pm 1,113E-2$ Gy)



Gambar 6. Grafik Dosis pada Colon Transverse Proyeksi LLD AP

Distribusi dosis boron jika dilihat dari sudut pandang *voxel* terlihat seperti pada gambar 7. Hasil menunjukkan bahwa distribusi boron pada sel kanker sudah merata pada proyeksi LLD AP, walaupun masih banyak boron yang terdeposisi pada organ target, namun masih lebih rendah dari nilai batas dosis. Sebaliknya pada proyeksi LLD PA masih banyak gradasi warna yang menunjukkan tidak meratanya distribusi boron pada sel kanker. Hal tersebut karena minimnya neutron termal yang mencapai sel kanker akibat panjangnya jarak antara *beam* dan sel kanker. Selain hal tersebut boron yang diinjeksikan sudah banyak mengalami ekskresi karena lamanya waktu iradisi. Sedangkan pada proyeksi *lateral dextra* dan *sinistra* terdapat gradasi warna yang hampir merata.



Gambar 7. Distribusi Boron pada Sel Kanker Pars *Colon Transvers* Proyeksi a) LLD AP b) LLD PA c) LLD *Dextra* d) LLD *Sinistra*

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian ini jika dipertimbangkan antara waktu iradiasi, dosis total, organ selamat dan distribusi dosis pada sel kanker, proyeksi *Left Lateral Decubitus (Antero Posterior)* merupakan proyeksi paling direkomendasikan untuk letak kanker pada colon transverse, disamping waktu *treatment* yang paling singkat (12 menit 12 detik), dosis isoeftif pada proyeksi ini merupakan paling rendah yaitu $0,710 \pm 0,002$ Gy, dan semua organ sekitar termasuk organ target tidak melampaui *dose constraints*. Distribusi boron pada proyeksi *Left Lateral Decubitus (Antero Posterior)* merupakan distribusi yang paling baik jika dibandingkan ketiga proyeksi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Roberto M et al. 2020. Evaluation of prognostic factors for survival in transverse colon cancer. *Cancers (Basel)*. **12**(9): 1.
- 2 Cann C, Dotan E. 2024. Transverse colon cancer: a call for focused research in an understudied heterogenous disease. *J. Gastrointest. Oncol.* **15**(4): 1981.
- 3 Vendrely V et al. 2022. Rectal cancer radiotherapy. *Cancer/Radiothérapie*. **26**(1): 272.
- 4 Li C, Wang Q, Jiang KW. 2021. What is

the Best Surgical Procedure of Transverse Colon Cancer? An Evidence Map and Minireview. *World J. Gastrointest. Oncol.* **13**(5): 391.

- 5 Putri SS, Harto AW, Sardjono Y. 2024. Computational assessment dose distribution of the antero-posterior and postero-anterior in Boron Neutron Capture Therapy for colorectal cancer. *J. Phys. Conf. Ser.* **2828**(1): .
- 6 Takada K, Kumada H, Matsumura A, Sakurai H, Sakae T. 2020. Computational evaluation of dose distribution for BNCT treatment combined with X-ray therapy or proton beam therapy. *Appl. Radiat. Isot.* **165**: 109295.
- 7 Suzuki M. 2020. Boron neutron capture therapy (BNCT): a unique role in radiotherapy with a view to entering the accelerator-based BNCT era. *Int. J. Clin. Oncol.* **25**(1): 43.
- 8 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. *J. Pers. Med.* **11**(8): 825.
- 9 Wang S, Zhang Z, Miao L, Li Y. 2022. Boron Neutron Capture Therapy: Current Status and Challenges. *Front. Oncol.* **12**(March): 1.

- 10 Zhang Q-Y, Wang F-X, Jia K-K, Kong L-D. 2018. Natural Product Interventions for Chemotherapy and Radiotherapy-Induced Side Effects. *Front. Pharmacol.* **9**: 1253.
- 11 Takada K, Sato T, Kumada H, Sakurai H, Sakae T. 2020. Evaluation of RBE-weighted doses for various radiotherapy beams based on a microdosimetric function implemented in PHITS. *J. Phys. Conf. Ser.* **1662**(1): 012004.
- 12 Hu N, Tanaka H, Ono K. 2022. Design of a filtration system to improve the dose distribution of an accelerator-based neutron capture therapy system. *Med. Phys.* **49**(10): 6609.
- 13 Kato R et al. 2022. Dosimetric effects of the ipsilateral shoulder position variations in the sitting-positioned boron neutron capture therapy for lower neck tumor. *Appl. Radiat. Isot.* **188**: 110397.
- 14 Hu N, Tanaka H, Takata T, Endo S, Masunaga S, Suzuki M, Sakurai Y. 2020. Evaluation of PHITS for microdosimetry in BNCT to support radiobiological research. *Appl. Radiat. Isot.* **161**: 109148.
- 15 Kumada H, Takada K, Sato T, Sakurai H, Sakae T. 2020. Multimodal Monte Carlo treatment system capable of microdosimetry with PHITS. *J. Phys. Conf. Ser.* **1662**(1): 012020.
- 16 Ardana IM, Sardjono Y. 2017. Optimization of a Neutron Beam Shaping Assembly Design for Bnct and Its Dosimetry Simulation Based on Mcnpx. *J. Teknol. Reakt. Nukl. Tri Dasa Mega.* **19**(3): 121.
- 17 Ramadhani ADP, Susilo S, Nurfatthan I, Sardjono Y, Widarto W, Wijaya GS, Triatmoko IM. 2020. Dose Estimation of the Bnct Water Phantom Based on Mcnpx Computer Code Simulation. *J. Teknol. Reakt. Nukl. Tri Dasa Mega.* **22**(1): 23.