

ANALISIS DOSIS BNCT PADA KANKER KULIT MELANOMA MENGGUNAKAN MCNPX DENGAN SUMBER NEUTRON DARI KOLOM TERMAL REAKTOR KARTINI

DOSE ANALYZE OF BNCT AT SKIN CANCER MELANOMA USING MCNPX

Oleh:

Siti Rosidah, Yohannes Sardjono, Yosaphat Sumardi

Email : sitirosidah203@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya laju dosis total yang diterima serta waktu iradiasi yang dibutuhkan pada terapi kanker kanker kulit melanoma menggunakan BNCT dengan MCNPX. Perkiraan laju dosis yang diterima oleh tubuh dibutuhkan agar didapatkan informasi efek dosis radiasi dan waktu iradiasi dibutuhkan untuk memastikan dosis yang diterima oleh jaringan kanker kulit melanoma cukup untuk membunuhnya. Penelitian ini menggunakan simulasi dengan program MCNPX dengan cara mendefinisikan geometri dan komponen penyusun kulit sebagai objek yang diteliti serta sumber radiasi yang digunakan. Keluaran yang didapatkan MCNPX adalah fluks neutron dan dosis hamburan neutron yang keluar dari kolimator. Nilai fluks neutron digunakan untuk menghitung dosis yang berasal dari interaksi neutron dengan material di jaringan. Berdasarkan hasil penelitian ini diketahui bahwa laju dosis pada jaringan kanker untuk dosis boron (10; 15; 20; 25; 30; 35) $\mu\text{g/g}$ kanker secara berturut-turut adalah (0,019241; 0,021854; 0,022902; 0,0271275; 0,0297658; 0,0343472) Gy/detik dan waktu iradiasi yang dibutuhkan adalah (25,98; 22,87; 21,83; 18,43; 16,79; 14,55) menit. Waktu iradiasi untuk jaringan kanker semakin singkat saat penggunaan konsentrasi boron pada jaringan kanker kulit semakin tinggi.

Kata kunci: BNCT, kanker kulit melanoma, MCNPX

Abstract

This research aims to determine the amount of radiation dose rate that can be accepted and the irradiation time that is required from BNCT cancer therapy at skin cancer melanoma using MCNPX. This research used simulation with MCNPX program by defining the geometry and the skin component as the objects of the research, and describing the radiation source that were used. The output obtained from MCNPX simulation were the flux neutron and the neutron dose scattering that came out from the collimator. The value of flux neutron was used to calculate the dose which comes from the interaction between the neutron and the material in the cancer tissue. Based on the results of the research, the dose rate at cancer tissue for boron of (10; 15; 20; 25; 30; 35) $\mu\text{g/g}$ cancer is about (0,019241; 0,021854; 0,022902; 0,0271275; 0,0297658; 0,0343472) Gy/second and requires (25,98; 22,87; 21,83; 18,43; 16,79; 14,55) minutes of irradiation time. The irradiation time needed for cancer tissue is shorter when boron concentration at the cancer tissue is higher.

Keywords: BNCT, skin cancer melanoma, MCNPX

PENDAHULUAN

Kanker merupakan penyakit yang dicirikan dengan pertumbuhan sel yang tidak terkontrol dan penyebaran sel abnormal. Kanker disebabkan oleh faktor eksternal, seperti: merokok, terinfeksi oleh virus atau bakteri, serta gaya hidup yang tidak sehat; dan faktor internal, seperti: mewarisi gen yang termutasi, hormon, serta kondisi imun tubuh (*American Cancer Society*, 2015).

Kasus kanker terbanyak adalah kanker paru-paru, kanker payudara, dan kanker kolorektal. Sementara kematian terbanyak disebabkan oleh kanker paru, kanker lambung, dan kanker hati. Pada laki-laki, kasus kanker yang paling banyak adalah kanker prostat (untuk negara maju) dan kanker paru-paru (untuk negara berkembang), sementara pada wanita adalah kanker payudara (*World Health Organisation*, 2014).

Kanker kulit merupakan kanker yang disebabkan oleh pertumbuhan sel-sel kulit yang tidak terkontrol. Sel-sel penyusun kulit adalah sel skuamosa, sel basal, dan sel melanosit. Pertumbuhan abnormal pada sel skuamosa menyebabkan terjadinya karsinoma sel skuamosa, sementara pertumbuhan abnormal pada sel basal menyebabkan terjadinya karsinoma sel basal. Karsinoma sel skuamosa dan sel basal termasuk ke dalam golongan kanker kulit non melanoma, sementara pertumbuhan abnormal pada sel melanosit menyebabkan terjadinya kanker kulit melanoma. Penyebab utama kanker kulit adalah terkena paparan sinar ultraviolet (UV). Sinar UV dapat berasal dari matahari, *tanning bed*, atau *sun lamp*. Sinar UV-lah yang merusak DNA sel penyusun kulit (*American Cancer Society*, 2016).

Metode terapi kanker yang sudah ada saat ini yaitu metode pembedahan atau operasi, kemoterapi, dan radioterapi. Metode pembedahan adalah terapi kanker dengan cara pengambilan jaringan kanker. Kemoterapi adalah terapi kanker yang menggunakan obat-obatan untuk membunuh sel kanker. Radioterapi adalah terapi kanker yang menggunakan partikel atau gelombang berenergi tinggi seperti sinar-X untuk membunuh sel kanker. Metode tersebut memanfaatkan sifat ionisasi yang dihasilkan oleh sumber pada daerah yang terkena paparan radiasi. Sumber radiasi bisa berasal dari luar tubuh (eksternal) maupun dari dalam tubuh (internal) dengan cara implan atau ditanamkan sumber radioaktif (*American Cancer Society*, 2015).

Seiring dengan perkembangan teknologi, ditemukanlah metode radioterapi yang aman untuk terapi kanker, yaitu *Boron Neutron Capture*

Therapy (BNCT). BNCT diperkenalkan oleh G.L. Locher, seorang biofisikawan dari institusi Franklin di Pennsylvania. BNCT merupakan radioterapi biner yang menggunakan nuklida non radioaktif, yakni boron-10 yang mempunyai kecenderungan tinggi menangkap neutron berenergi rendah (neutron termal). Hal yang harus diperhatikan dalam penelitian BNCT adalah pengaturan dosis radiasi yang diterima oleh tubuh dan kualitas sinar radiasi neutron yang digunakan. Pengaturan dosis radiasi ini harus menjamin keamanan dan keefektifan terapi, yakni efek samping dari pengobatan sekecil mungkin; dosis yang diterima maksimal; dan waktu iradiasi singkat (Huang, 2009).

METODE PENELITIAN

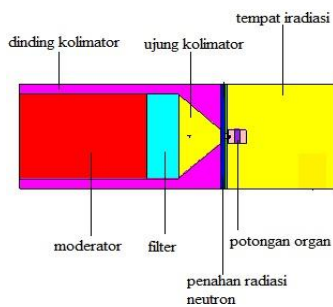
Penelitian ini merupakan penelitian simulasi fasilitas iradiasi untuk terapi kanker menggunakan BNCT. Penelitian ini dilakukan di Pusat Tenaga Akselerator dan Proses Bahan Badan Tenaga Nuklir Nasional (PSTA-BATAN) Yogyakarta.

Penelitian ini dilakukan dengan terlebih dahulu memutuskan memilih jenis kanker kulit serta posisinya sebagai objek yang diteliti. Setelah itu menghitung volume kanker dan jaringan lain. Hal tersebut dibutuhkan karena *tally* (mode perhitungan) yang digunakan dalam penelitian ini memerlukan masukan volum. Setelah semua data yang dibutuhkan untuk membuat model fasilitas iradiasi dan organ yang diiradiasi lengkap, tahap selanjutnya adalah membuat kode input MCNPX. Setelah bentuk geometri organ dan kolimator selesai, tahap berikutnya yaitu memberi variasi konsentrasi boron pada bagian fraksi atom/fraksi massa dari material penyusun jaringan. Di sini digunakan 6 variasi konsentrasi boron, yaitu 10 $\mu\text{g/g}$ kanker, 15 $\mu\text{g/g}$ kanker, 20 $\mu\text{g/g}$ kanker, 25 $\mu\text{g/g}$ kanker, 30 $\mu\text{g/g}$ kanker, dan 35 $\mu\text{g/g}$ kanker. Setelah kode input MCNPX tersebut selesai, tahap selanjutnya yaitu melakukan *running* MCNPX dengan aplikasi *command prompt* (cmd) untuk mendapatkan nilai fluks neutron termal dan epitermal. Tahap selanjutnya yaitu melakukan perhitungan dosis BNCT dengan menggunakan aplikasi Ms. Excel. Kemudian menganalisis data serta mengambil kesimpulan dari penelitian.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, sumber neutron yang digunakan adalah sumber neutron dari keluaran kolimator pada kolom termal Reaktor Kartini yang didesain secara konseptual oleh Fauziah (2013). Kolimator tersebut menggunakan nikel murni

dengan ketebalan 5 cm sebagai dinding kolimator, alumunium dengan ketebalan 60 cm sebagai moderator, nikel-60 dengan ketebalan 15 cm sebagai filter neutron, bismut dengan ketebalan 2 cm sebagai perisai sinar gamma dan ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ -polietilen dengan ketebalan 3 cm sebagai penahan radiasi neutron. Alasan mengapa penelitian ini menggunakan desain tersebut karena keluaran neutronnya sudah memenuhi rekomendasi IAEA. Desain kolimator dan keluaran neutron yang dihasilkan tersebut merupakan hasil simulasi menggunakan MCNP5. Sementara pada penelitian ini menggunakan MCNPX, sehingga peneliti membuat kolimator baru dengan desain yang sama dan memiliki hasil mendekati hasil keluaran kolimator desain Fauziah (2013).



Gambar 1. Desain kolimator beserta letak organ yang diradiasi dilihat dari sudut pandang samping.

Gambar 1 menunjukkan desain kolimator yang digunakan pada penelitian ini beserta organ yang diradiasi dilihat dari sudut pandang depan. Warna ungu menunjukkan dinding kolimator, berupa silinder berdiameter 54 cm dan menggunakan material nikel murni dengan ketebalan 5 cm. Warna merah menunjukkan moderator neutron, berupa silinder dengan diameter 44 cm dan ketebalan 60 cm, serta menggunakan material alumunium. Warna biru muda menunjukkan filter neutron, berupa silinder dengan diameter 44 cm dan ketebalan 15 cm, serta menggunakan material nikel-60. Warna kuning menunjukkan ujung kolimator dan tempat iradiasi, yang berisi udara. Warna biru tua dan hijau menunjukkan perisai sinar gamma dan penahan radiasi neutron, serta warna merah muda yang menunjukkan potongan organ lengan atas yang terdapat melanoma. Potongan organ lengan tersebut berupa silinder dengan diameter 8,7 cm yang di dalamnya terdapat tulang dengan diameter 2,4 cm, jaringan otot dan jaringan kanker kulit melanoma.

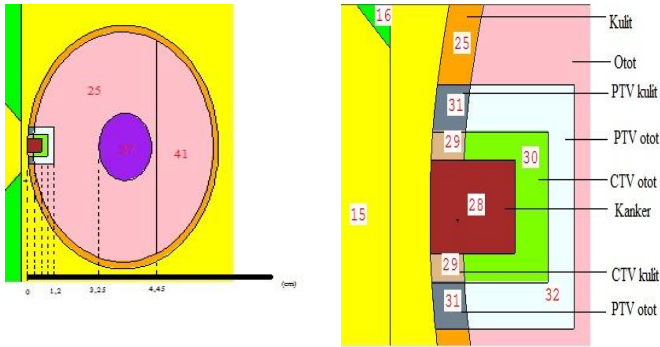
Kode input MCNPX untuk mencari nilai keluaran kolimator pada penelitian ini

menggunakan simulasi untuk memodelkan sumber radiasi (*source definition* atau *sdef*). Pemodelan sumber *sdef* melibatkan banyak variabel yang harus didefinisikan. Variabel tersebut meliputi jenis berkas radiasi, bentuk sumber, energi, arah radiasi beserta distribusinya. Setiap variabel diwakili oleh *keyword* tertentu.

Karena keluaran neutron dari Reaktor Kartini berupa neutron kontinu, maka dibutuhkan spektrum dosis energi (*de*) dan fungsi dosis (*df*). Nilai *de* dan *df* dibutuhkan agar MCNPX dapat menganalisis *tally* yang diinginkan. *Tally* yang digunakan dalam penelitian ini adalah F:4 yaitu *tally* untuk menghitung fluks rerata yang melewati cell. Untuk memperoleh hasil keluaran fluks neutron pada tempat iradiasi, peneliti membuat input iterasi neutron pada MCNPX sebanyak 1.000.000 nps. Dari hasil running MCNPX, diperoleh fluks rerata neutron pada tempat iradiasi sebesar $8,31952 \times 10^6 \text{ n cm}^2 \text{ s}^{-1}$ untuk neutron termal dan $1,90346 \times 10^9 \text{ n cm}^2 \text{ s}^{-1}$ untuk neutron epitermal.

Tabel 1. Hasil Keluaran kolimator Fauziah dan Kolimator Penelitian

Parameter	Kolimator desain Fauziah	Kolimator pada penelitian
Fluks neutron termal (n cm ² s ⁻¹)	$1,155 \times 10^8$	$8,31952 \times 10^6$
Fluks neutron epitermal (n cm ² s ⁻¹)	$1,65 \times 10^9$	$1,90346 \times 10^9$
Rasio antara fluks neutron termal dan epitermal	0,007	0,004
Laju dosis gamma / fluks neutron epitermal (Gy cm ² n ⁻¹)	$1,16 \times 10^{-13}$	$2,515430 \times 10^{-14}$



a. Organ lengan atas yang permukaan kulitnya terdapat kanker kulit melanoma
 b. Melanoma pada permukaan kulit

Gambar 2. Desain organ yang diradiasi dilihat dari sudut pandang atas.

Gambar 2.a memperlihatkan geometri organ yang terdapat kanker kulit melanoma. Warna oranye, merah muda, ungu, merah, coklat muda, hijau, abu-abu, dan putih secara berurutan menunjukkan kulit, otot, tulang lengan atas, kanker kulit melanoma, *clinical tumor volume* (ctv) kulit, *clinical tumor volume* (ctv) otot, *planning tumor volume* (ptv) kulit, dan *planning tumor volume* (ptv) otot. Bentuk geometri organ kulit berupa silinder, berjari-jari 4,35 cm dan tinggi 7 cm yang terletak sejajar dengan sumbu Y. Untuk otot dan tulang, bentuk geometrinya juga silinder dengan tinggi 7 cm dan jari-jari 4,1 cm (untuk otot) dan 1,2 cm (untuk tulang).

Sementara gambar 2.b merupakan geometri kanker kulit melanoma. Pada geometri kanker kulit melanoma, peneliti membaginya menjadi 5 jenis, yaitu kanker, ctv kulit, ctv otot, ptv kulit, dan ptv otot. Geometri kanker kulit melanoma berupa balok berdimensi 0,6 cm × 0,4 cm × 0,3 cm. Sementara geometri ctv kulit, ptv kulit, ctv otot dan ptv otot juga berupa balok yang ditambah 0,2 cm dari ukuran kanker kulit melanoma.

Pada penelitian ini, penulis menggunakan 6 variasi konsentrasi boron yang diinjeksikan ke dalam jaringan kanker, yaitu 10 µg/g kanker; 15 µg/g kanker; 20 µg/g kanker; 25 µg/g kanker; 30 µg/g kanker; dan 35 µg/g kanker. Untuk masing-masing konsentrasi boron tersebut dilakukan *running* MCNPX untuk memperoleh nilai fluks neutron pada jaringan kanker dan lainnya.

Tabel 2. Fluks neutron pada jaringan dengan konsentrasi boron 10 µg/g kanker

Jaringan	Nomor cell	Ke-dalaman (cm)	Fluks neutron termal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epidermal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
kanker	28	0	1,73808E+09	1,18981E+10
ctv kulit	29	0,2	6,83940E+09	2,05489E+11
ptv kulit	31	0,2	2,03865E+10	2,89142E+11
ctv otot	30	0,6	5,90696E+10	2,41594E+11

Jaringan	Nomor cell	Ke-dalaman (cm)	Fluks neutron termal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epidermal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
kanker	28	0	1,73864E+09	2,34093E+10
ctv kulit	29	0,2	1,31131E+10	3,20119E+11
ptv kulit	31	0,2	3,08253E+10	5,00753E+11
ctv otot	30	0,6	8,90851E+10	3,13223E+11
ptv otot	32	0,9	8,99697E+10	4,10841E+11
otot	26	1,2	5,19107E+11	6,12967E+11
tulang	27	3,25	5,08191E+11	2,93727E+11
kisi	40	4,45	9,32432E+10	3,39519E+10

Tabel 3. Fluks neutron pada jaringan dengan konsentrasi boron 15 µg/g kanker

Jaringan	Nomor cell	Ke-dalaman (cm)	Fluks neutron termal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epidermal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
kanker	28	0	1,73719E+09	1,18982E+10
ctv kulit	29	0,2	6,82920E+09	2,05489E+11
ptv kulit	31	0,2	2,03995E+10	2,89143E+11
ctv otot	30	0,6	5,90793E+10	2,41594E+11
ptv otot	32	0,9	5,95565E+10	2,64459E+11
otot	26	1,2	3,35103E+11	4,07266E+11
tulang	27	3,25	3,08657E+11	1,90034E+11
kisi	40	4,45	5,81695E+10	2,24758E+10

Tabel 4. Fluks neutron untuk setiap jaringan dengan konsentrasi boron 20 µg/g kanker

Jaringan	Nomor cell	Ke-dalaman (cm)	Fluks neutron termal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epidermal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
Kanker	28	0	1,62491E+09	1,79733E+10
ctv kulit	29	0,2	1,03236E+10	3,10412E+11
ptv kulit	31	0,2	3,08059E+10	4,36778E+11
ctv otot	30	0,6	8,92377E+10	3,64952E+11
ptv otot	32	0,9	8,99632E+10	3,99491E+11
Otot	26	1,2	5,08181E+11	6,15037E+11
Tulang	27	3,25	4,66237E+11	2,87064E+11
Kisi	40	4,45	8,77447E+10	3,39518E+10

Tabel 5. Fluks neutron untuk setiap jaringan dengan konsentrasi boron 25 µg/g kanker

Jaringan	Nomor cell	Ke-dalaman (cm)	Fluks neutron termal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epidermal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
Kanker	28	0	1,73808E+09	1,18981E+10
ctv kulit	29	0,2	6,83940E+09	2,05489E+11
ptv kulit	31	0,2	2,03865E+10	2,89142E+11
ctv otot	30	0,6	5,90696E+10	2,41594E+11

Jaringan	Nomor cell	Ke-dalaman (cm)	Fluks neutron termal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epitermal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
ptv otot	32	0,9	5,95518E+10	2,64458E+11
Otot	26	1,2	3,36290E+11	4,07147E+11
Tulang	27	3,25	3,08630E+11	1,90032E+11
Kisi	40	4,45	5,80843E+10	2,24757E+10

Tabel 6. Fluks nutron untuk setiap jaringan dengan konsentrasi boron 30 µg/g kanker

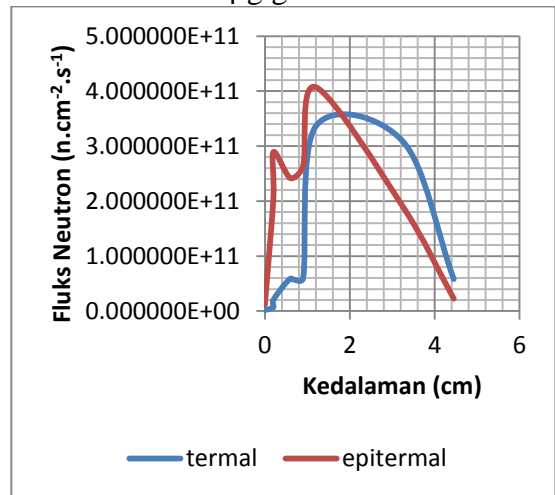
Jaringan	Nomor cell	Ke-dalaman (cm)	Fluks neutron termal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epitermal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
kanker	28	0	1,73853E+09	1,18980E+10
ctv kulit	29	0,2	6,84450E+09	2,05489E+11
ptv kulit	31	0,2	2,03800E+10	2,89141E+11
ctv otot	30	0,6	5,90648E+10	2,41594E+11
ptv otot	32	0,9	5,95494E+10	2,64458E+11
otot	26	1,2	3,36281E+11	4,07146E+11
tulang	27	3,25	3,08616E+11	1,90032E+11
kisi	40	4,45	5,80825E+10	2,24756E+10

Tabel 7. Fluks nutron untuk setiap jaringan dengan konsentrasi boron 35 µg/g kanker

Jaringan	Nomor cell	Ke-dalaman (cm)	Fluks neutron termal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Fluks neutron epitermal (n.cm ⁻² .s ⁻¹)
kanker	28	0	1,84335E+09	1,18980E+10
ctv kulit	29	0,2	8,20896E+09	2,05489E+11
ptv kulit	31	0,2	6,96633E+09	2,89141E+11
ctv otot	30	0,6	4,96145E+10	2,41593E+11
ptv otot	32	0,9	8,68118E+10	2,86912E+11
otot	26	1,2	5,47110E+11	5,24331E+11
tulang	27	3,25	4,94017E+11	2,26496E+11
kisi	40	4,45	1,00961E+10	2,40921E+10

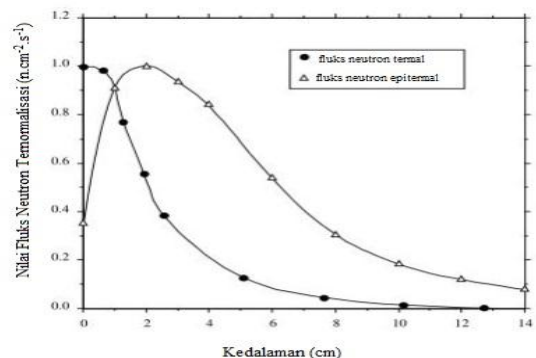
Tabel 2 sampai tabel 7 memperlihatkan nilai fluks neutron termal dan epitermal pada organ lengan atas yang terdapat kanker kulit melanoma hasil dari *running* MCNPX untuk konsentrasi boron 10 µg/g kanker, 15 µg/g kanker, 20 µg/g kanker, 25 µg/g kanker, 30 µg/g kanker, dan 35 µg/g kanker. Nilai fluks neutron termal dan epitermal pada tabel tersebut memiliki karakteristik yang hampir sama, yakni nilai fluks neutron termal dan epitermal mencapai titik tertinggi pada kedalaman 1,2 cm dari permukaan kulit dari arah datangnya sumber radiasi neutron, yakni pada jaringan otot. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3 yang memperlihatkan distribusi fluks neutron pada

kedalaman tertentu pada organ lengan untuk konsentrasi boron 30 µg/g kanker.



Gambar 3. Distribusi Fluks Neutron dalam Organ Lengan

Gambar 3 memperlihatkan perubahan nilai fluks neutron dalam organ lengan dalam kedalaman tertentu. Nilai fluks neutron termal mengalami kenaikan pada mulai 0 cm dan mencapai nilai tertinggi pada kedalaman 1,2 cm dan setelah kedalaman 3,25 cm nilainya mengalami penurunan secara signifikan. Demikian juga nilai fluks neutron epitermal yang mengalami kenaikan mulai dari kedalaman 0 cm dan mencapai puncak nilai tertinggi pada kedalaman 1,2 cm. Namun pada kedalaman 4,45 cm nilainya juga masih cukup tinggi. Pada gambar juga terlihat bahwa nilai fluks neutron termal dan epitermal bertemu pada titik potong pada kedalaman 1,8 cm dari permukaan. Hal tersebut cukup sesuai dengan teori. Karena menurut teori nilai fluks neutron termal mencapai puncak tertinggi pada kedalaman 0 – 3 cm dan neutron epitermal pada kedalaman 2 – 8 cm seperti pada gambar 4 (IAEA, 2001).



Gambar 4. Kurva distribusi fluks neutron termal dan epitermal (IAEA, 2001)

Dalam dosimetri BNCT, terdapat empat komponen dosis BNCT sesuai interaksi antara neutron dengan materi penyusun jaringan tubuh. Komponen dosis tersebut adalah dosis hamburan neutron, dosis gamma, dosis recoil proton dan

dosis alfa. Hasil *output* MCNPX yang dapat digunakan secara langsung yaitu fluks neutron termal dan dosis hamburan neutron termal pada jaringan kanker. Nilai fluks neutron termal tersebut digunakan untuk mencari laju dosis gamma, laju dosis proton dan laju dosis alfa. Laju dosis gamma berasal dari hasil reaksi neutron termal dan hidrogen-1. Laju dosis proton berasal dari hasil reaksi tangkapan neutron termal dengan nitrogen-14. Sementara laju dosis alfa berasal dari hasil reaksi neutron termal dan boron-10. Nilai laju dosis tersebut dikalikan dengan faktor bobot radiasi untuk mendapatkan laju dosis total. Faktor bobot radiasi merupakan besaran kuantisasi radiasi untuk menimbulkan kerusakan pada jaringan/organ. Laju dosis untuk setiap komponen dosis BNCT memiliki kecenderungan meningkat jika konsentrasi boron ditingkatkan. Pada perhitungan laju dosis, selain fluks neutron termal, nilai jumlah atom juga digunakan. Nilai jumlah atom dipengaruhi oleh banyaknya massa unsur yang berinteraksi dengan neutron termal. Massa unsur tersebut yaitu boron-10 yang massanya berubah sesuai variasi konsentrasinya serta massa nitrogen dan hidrogen yang cenderung tetap.

Dalam BNCT, dosis digunakan secara fraksi tunggal. Fraksi tunggal merupakan cara pemberian dosis secara langsung dalam satu kali iradiasi sehingga perlu diperhatikan dosis total yang diterima oleh jaringan sehat. Untuk menentukan apakah laju dosis yang diserap oleh jaringan tubuh aman atau tidak, maka digunakan besaran laju dosis serap total. Dosis serap total merupakan hasil perkalian laju dosis dengan waktu iradiasi. Waktu iradiasi diperoleh dari hasil pembagian dosis minimal perusak jaringan kanker dengan laju dosis total (Berlianti, 2013; Setiyadi, 2015). Batas minimal untuk membunuh sel kanker kulit melanoma adalah 30 – 36 Gy (Anand, 2013). Pada penelitian ini digunakan dosis 30 Gy sebagai dosis minimal perusak jaringan kanker.

$$waktu\ iradiasi = \frac{30\ (Gy)}{laju\ dosis\ total\ \left(\frac{Gy}{detik}\right)} \quad (1)$$

$$dosis\ serap\ total = laju\ dosis\ \left(\frac{Gy}{detik}\right) \times waktu\ iradiasi\ (detik) \quad (2)$$

Nilai laju dosis total dan waktu iradiasi pada penelitian ini untuk setiap variasi konsentrasi boron dapat dilihat pada tabel 20. Jumlah konsentrasi atom boron yang dibutuhkan untuk membunuh jaringan kanker umumnya diperkirakan sebanyak 10^9 atom dengan kelimpahan alami 19,9% per sel, yang diterjemahkan menjadi sekitar

35 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker, sehingga pada penelitian ini konsentrasi boron yang digunakan adalah 10 μg – 35 μg per gram jaringan kanker.

Tabel 8. Laju Dosis dan Waktu Iradiasi pada Jaringan Kanker

Konsentrasi Boron ($\mu\text{g/g}$ kanker)	Laju Dosis Total (Gy/detik)	Waktu Iradiasi (detik)	Waktu Iradiasi (menit)
10	0,019241	1559,176541	25,98
15	0,021854	1372,717077	22,87
20	0,022902	1309,929895	21,83
25	0,027128	1105,885096	18,43
30	0,029766	1007,866575	16,79
35	0,034347	873,4332847	14,55

Dari tabel 8 dapat dilihat semakin besar nilai konsentrasi boron yang digunakan, maka nilai laju dosis totalnya juga semakin besar dan waktu yang dibutuhkan untuk iradiasi semakin singkat. Hal ini disebabkan oleh semakin banyak jumlah boron pada jaringan yang semakin banyak. Hal inilah yang menjadi alasan kenapa dipilih konsentrasi boron 35 $\mu\text{g/g}$ kanker sebagai konsentrasi yang optimal untuk mengiradiasi organ lengan yang terdapat kanker kulit melanoma pada permukaan kulitnya. Optimal yang dimaksud di sini adalah waktu iradiasi yang paling singkat yaitu 14,55 menit.

Dari tabel 8 juga dapat diketahui jumlah dosis serap yang diterima oleh setiap jaringan dengan menggunakan persamaan 2. Nilai dosis serap tersebut ditunjukkan pada tabel 9.

Tabel 9. Nilai Dosis Serap pada Jaringan Kulit untuk setiap variasi Konsentrasi Boron

Konsentrasi Boron ($\mu\text{g/g}$ kanker)	Dosis Serap(Gy)		
	ctv kulit	ptv kulit	kulit
10	27,59	24,63	16,76
15	24,57	13,20	14,99
20	23,84	12,64	14,54
25	20,45	10,83	12,71
30	19,04	9,84	11,48
35	16,68	9,69	10,11

Tabel 9 menunjukkan nilai dosis serap pada jaringan kulit untuk setiap variasi konsentrasi boron. Semakin besar nilai konsentrasi boron yang digunakan, maka semakin sedikit nilai dosis serap pada jaringan karena waktu iradiasi yang semakin singkat. Dengan mengetahui nilai dosis serap yang diterima oleh setiap jaringan, dapat diperkirakan efek yang diterima oleh jaringan dengan membandingkan nilai batas dosis tiap jaringan. Efek yang dapat diketahui dengan melihat nilai dosis serap adalah efek deterministik. Efek

deterministik adalah efek radiasi yang langsung dirasakan oleh pasien setelah proses iradiasi. Tabel 9 menunjukkan efek deterministik yang terjadi pada kulit pada rentang dosis serap tertentu.

Tabel 10. Efek Deterministik pada Kulit (Bapeten, 2015)

Efek Radiasi	Rentang Dosis (Gy)	Waktu
Eritema awal	2 – 3	6 – 24 minggu
Epilasi dan deskuamasi kering	3 – 12	3 – 6 minggu
Deskuamasi basah	12 – 20	4 – 6 minggu
Nekrosis	>20	10 minggu

Dengan mengacu pada tabel 10, dapat diperkirakan efek deterministik yang terjadi pada jaringan kulit sehat dan kulit pada wilayah ctv dan ptv. Hal tersebut ditunjukkan pada tabel 11.

Tabel 11. Perkiraan Efek Deterministik yang Terjadi pada Jaringan Kulit

Jaringan	Konsentrasi Boron ($\mu\text{g/g}$ kanker)	Dosis Serap (Gy)	Perkiraan Efek yang terjadi
ctv kulit	10	27,59	Nekrosis
	15	24,57	Nekrosis
	20	23,84	Nekrosis
	25	20,45	Nekrosis
	30	19,04	Deskuamasi basah
	35	16,68	Deskuamasi basah
ptv kulit	10	24,63	Nekrosis
	15	13,20	Deskuamasi basah
	20	12,64	Deskuamasi basah
	25	10,83	Epilasi dan deskuamasi kering
	30	9,84	Epilasi dan deskuamasi kering
	35	9,69	Epilasi dan deskuamasi kering
Kulit	10	8,76	Epilasi dan deskuamasi kering
	15	7,99	Epilasi dan deskuamasi kering
	20	7,54	Epilasi dan deskuamasi kering
	25	6,71	Epilasi dan deskuamasi kering
	30	6,48	Epilasi dan deskuamasi kering
	35	5,11	Epilasi dan deskuamasi

Jaringan	Konsentrasi Boron ($\mu\text{g/g}$ kanker)	Dosis Serap (Gy)	Perkiraan Efek yang terjadi
			kering

Berdasarkan efek deterministik pada jaringan kulit yang ditunjukkan pada tabel 11, tidak ada variasi konsentrasi boron yang tidak memberikan efek samping sama sekali pada jaringan kulit. Hal ini karena semua dosis serap pada jaringan tersebut melebihi 3 Gy yang merupakan batas dosis maksimal pada kulit. Efek yang mungkin terjadi apabila organ lengan yang terdapat kanker kulit melanoma diiradiasi dengan sumber neutron yang berasal dari kolom termal Reaktor Kartini adalah eritema, epilasi, deskuamasi dan nekrosis pada jaringan kulit di sekitar tempat kanker kulit melanoma tersebut. Eritema merupakan gejala kulit kemerahan akibat pelebaran pembuluh darah kapiler. Epilasi ditandai dengan gejala rambut pada jaringan kulit rontok sampai akarnya. Deskuamasi kering adalah gejala dimana kulit terluar mengalami pengelupasan. Deskuamasi basah adalah gejala dimana kulit mengalami pengelupasan disertai pelapuhan dan bernanah. Sementara nekrosis adalah kematian jaringan kulit.

Dengan mempertimbangkan efek yang terjadi pada jaringan kulit tersebut maka dipilihlah konsentrasi boron 35 $\mu\text{g/g}$ kanker yang cukup sesuai untuk terapi kanker kulit melanoma menggunakan BNCT dengan harapan bisa meminimalisasi waktu iradiasi dan jumlah boron pada jaringan kanker kulit melanoma sudah cukup untuk membunuh jaringan kanker tersebut.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan penelitian analisis dosis BNCT pada kanker kulit melanoma yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Konsentrasi boron yang optimal untuk mengobati kanker kulit melanoma dengan mempertimbangkan dosis yang diterima jaringan sehat, ctv kulit, ptv kulit dan kanker adalah konsentrasi 35 $\mu\text{g/g}$ kanker.
2. Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan iradiasi jaringan kanker kulit melanoma semakin cepat dengan bertambahnya konsentrasi boron yang digunakan. Waktu paling singkat yang dibutuhkan untuk iradiasi jaringan kanker kulit melanoma agar menerima dosis yang cukup untuk membunuh jaringan kanker adalah pada

konsentrasi 35 $\mu\text{g/g}$ kanker yaitu 14,55 menit.

World Health Organization. (2014). *Cancer Country Profiles 2014*. World Health Organization. Jakarta, Indonesia

Saran

Demi memperoleh hasil yang lebih baik, maka saran yang diberikan untuk penelitian berikutnya adalah :

- a. Membuat geometri manusia secara utuh, tidak hanya berupa potongan organ tubuhnya.
- b. Dilakukan penelitian lebih lanjut tentang dosis kanker kulit melanoma dengan kolimator dan sumber sebenarnya dari Reaktor Kartini agar mendapatkan hasil yang lebih akurat lagi.
- c. Pengambilan sampel data harus lebih spesifik lagi dengan mengambil data dari rumah sakit untuk pasien kanker kulit melanoma.

DAFTAR PUSTAKA

- American Cancer Society. (2015). *Cancer Facts & Figures 2015*. Atlanta: American Cancer Society.
- American Cancer Society. (2016). *Cancer Facts & Figures 2016*. Atlanta: American Cancer Society.
- American Cancer Society. (2016). *Melanoma Skin Cancer*. Atlanta: American Cancer Society.
- Amin Shokr, A. *et al.* (2001). *Current Status of Neutron Capture Therapy*, IAEA-TECDOC-1223. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency.
- Booth, T.E. *et al.* (2003). *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, volume I: User's Guide*. New Mexico: Los Alamos National Laboratory.
- Cember H, Johnson T. (2009). *Health Physics*. New York: The Mc Graw-Hill Compaines. New York: The Mc Graw-Hill Compaines.
- Fauziah, Nina. (2013). *A Conceptual Design of Neutron Collimator in Thermal Column of Kartini Research Reactor of Boron Neutron Capture Therapy*. Skripsi: Fakultas Teknik – Universitas Gajah Mada.
- IAEA. (2001). *Current Status of Neutron Capture Therapy*. Wina:IAEA.
- Muslih, Ilma. (2015). *Dasar-Dasar Pemrograman MCNPX*. Yogyakarta:PSTA-BATAN.
- PSTA BATAN. (2013). *Reaktor Kartini*. Yogyakarta: BATAN Yogyakarta.