
Jurnal *Rekayasa Elektrika*

VOLUME 15 NOMOR 1

April 2019

**Modifikasi Fantom ORNL_MIRD untuk Kebutuhan Simulasi Monte Carlo
Pasien Radioterapi Kanker Payudara Menggunakan MCNPX** 34-39

Layna Miska, Rini Safitri, Irwandi, dan Elin Yusibani

JRE	Vol. 15	No. 1	Hal 1-74	Banda Aceh, April 2019	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	----------	---------------------------	--------------------------------------

Modifikasi Fantom ORNL_MIRD untuk Kebutuhan Simulasi Monte Carlo Pasien Radioterapi Kanker Payudara Menggunakan MCNPX

Layna Miska, Rini Safitri, Irwandi, dan Elin Yusibani
Program Studi Magister Fisika, Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Syiah Kuala
Jln. Syeh Abdurrauf No.3, Kopelma Darussalam, Banda Aceh 23111
e-mail: rsafitri@unsyiah.ac.id

Abstrak—Dalam fisika medis, simulasi sebaran dosis radiasi dalam tubuh pasien radioterapi pada umumnya dilakukan menggunakan metode Monte Carlo. Namun dalam melakukan simulasi ini, para fisikawan medis seringkali dihadapkan pada masalah ketidaksesuaian geometri fantom dengan kebutuhan simulasi. Fantom ORNL-MIRD merupakan fantom yang paling sering digunakan dalam simulasi Monte Carlo. Dalam simulasi radioterapi, sel kanker biasanya hanya diasumsikan ada di dalam tubuh fantom tanpa adanya bentuk yang konkret. Hal ini dapat menyebabkan pemberian dosis radiasi yang tidak tepat pada sel kanker. Fantom ORNL-MIRD juga hanya tersusun dari tiga material, yaitu tulang, paru-paru, dan sisanya dianggap sebagai jaringan lunak. Hal ini tentu memberikan hasil simulasi yang kurang tepat terutama pada kasus radioterapi kanker payudara dimana payudara tersusun atas jaringan adiposa. Penelitian ini bertujuan membuat pemodelan fantom ORNL_MIRD yang sesuai untuk kebutuhan simulasi Monte Carlo pasien kanker payudara. Modifikasi fantom akan dilakukan pada struktur jaringan lunak bagian payudara dan struktur pada jaringan kulit. Sel kanker dengan diameter 2 cm juga ditambahkan dalam payudara sebelah kiri pada kedalaman 2,5 cm. Uji coba dilakukan dengan menembakkan sinar- γ dari radionuklida ^{60}Co dengan energi 1,1732 MeV dan 1,3325 MeV dan probabilitas masing-masing yaitu 0,989 dan 0,998. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang besar sebelum dan sesudah modifikasi. Nilai laju dosis serap pada payudara dengan jaringan lunak tanpa sel tumor adalah 0,31 mGy/s dengan relative error 0,0023, sedangkan laju dosis serap pada payudara dengan jaringan lunak dan sel tumor adalah 0,2 mGy/s dengan relative error 0,0023.

Kata kunci: *fantom ORNL-MIRD, radioterapi, kanker payudara, monte carlo, MCNPX*

Abstract—In medical physics, the simulation of radiation dose distribution in the body of radiotherapy patients is generally carried out using the Monte Carlo method. But in conducting this simulation, medical physicists are often faced with the incompatibility problems of phantom geometry with simulation needs. Phantom ORNL-MIRD is the most commonly used phantom in simulation. In a radiotherapy simulation, cancer cells are usually only assumed to be in the phantom's body without any concrete form. This can cause the administration of radiation doses that are not right on cancer cells. Phantom ORNL-MIRD is also only composed of three materials, namely bone, lung, and the rest are considered as soft tissue. This certainly provides inappropriate simulation results, especially in the case of breast cancer radiotherapy where the breast is composed of adipose tissue. This study aims to make ORNL_MIRD phantom modeling suitable for the needs of Monte Carlo simulations of breast cancer patients. Phantom modification will be carried out on the soft tissue structure of the breast and the structure of the skin tissue. Cancer cells with a diameter of 2 cm were also added to the left breast at a depth of 2.5 cm. The γ rays from radionuclide ^{60}Co with energy of 1.1732 MeV and 1.3325 MeV and the probabilities of 0.989 and 0.998, respectively, was exposing to the phantom. The simulation results show that there are large differences before and after modification. Absorption dose values in the breast with soft tissue without tumor cells were 0.31 mGy with a relative error of 0.0023, while the absorbency dose rate in the breast with soft tissue and tumor cells was 0.2 mGy with a relative error of 0.0023.

Keywords: *phantom ORNL-MIRD, radiotherapy, breast cancer, monte carlo, MCNPX*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Salah satu pemanfaatan radiasi dalam bidang medis adalah terapi radiasi atau radioterapi. Radioterapi

merupakan salah satu jenis pengobatan dimana radiasi pengion dimanfaatkan sebagai sumbernya. Radioterapi biasanya digunakan sebagai pilihan pengobatan penyakit kanker. Adapun jenis kanker yang seringkali dianjurkan

untuk mendapat perlakuan radioterapi adalah kanker payudara. Kanker payudara diketahui sebagai jenis kanker yang paling sering muncul pada wanita dan menyebabkan nilai kematian bagi wanita tertinggi yaitu 522.000 kematian pada tahun 2012. Kanker payudara juga merupakan salah satu jenis kanker yang paling sering didiagnosis di dunia dengan 1,7 juta kasus atau sekitar 11,9% dari keseluruhan diagnosis kanker. Angka ini menduduki peringkat kedua setelah kanker paru-paru dengan 1,8 juta kasus atau sekitar 13% dari total diagnosis kanker [1].

Radiasi yang digunakan dalam radioterapi adalah radiasi dosis tinggi dengan tingkat energi berada dalam rentang 10 keV sampai 35 MeV. Oleh karena itu, sebelum pasien diberi perlakuan radioterapi, penting bagi fisikawan medis untuk melakukan simulasi komputer guna mengetahui pemberian dosis radiasi yang tepat [2]. Metode yang umum digunakan untuk melakukan simulasi radioterapi adalah metode Monte Carlo [3].

Dalam melakukan simulasi radioterapi pada pasien, masalah yang seringkali dihadapi adalah besarnya perbedaan antara fantom tubuh dengan kondisi tubuh manusia yang sebenarnya. Fantom model tubuh manusia yang digunakan dalam *Treatment planning* merupakan pengganti tubuh pasien yang sebenarnya. Fantom ini dapat dibuat secara manual maupun melalui simulasi komputer [4]. Namun perbedaan struktur fantom dengan tubuh manusia yang sebenarnya menyebabkan sebaran dosis hasil simulasi akan berbeda dengan kondisi sebenarnya. Kondisi ini menyebabkan sulitnya memperkirakan dosis radiasi yang tepat untuk membunuh sel kanker serta efek samping yang dapat terjadi pada tubuh pasien pasca radioterapi [5].

Pada kasus simulasi Monte Carlo untuk kasus radioterapi, para fisikawan medis menggunakan fantom dengan berbagai bentuk dan pendekatan tergantung kemampuan dari *software* yang digunakan. Sebagai contoh, fantom kepala dianggap berbentuk bola, atau fantom tubuh dan payudara yang dianggap berbentuk kotak.

Salah satu *software* yang memungkinkan penggunaanya menyusun geometri fantom dengan lebih leluasa adalah Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX). MCNPX merupakan sebuah *software* berbasis Monte Carlo yang digunakan untuk mensimulasikan jejak partikel radiasi dalam material. MCNPX dapat mensimulasikan transport radiasi *step by step* sehingga mendekati kondisi sebenarnya. *Software* ini juga menyediakan database berbagai bentuk geometri yang dapat digunakan untuk menyusun fantom tubuh manusia dengan lebih sempurna [6].

Dalam MCNPX, fantom yang seringkali digunakan adalah fantom ORNL. Fantom ini telah digunakan secara luas dalam mensimulasikan transport radiasi dalam materi terutama menggunakan metode Monte Carlo. Fantom ORNL-MIRD dipublikasikan oleh Krstic dan Nikezic pada tahun 2007 [7]-[9].

Tubuh manusia merupakan sebuah struktur yang sangat rumit yang terdiri dari berbagai jaringan dan organ dengan bentuk serta atom penyusun yang sangat

<i>J</i>	<i>m</i>	<i>d</i>	<i>Geom</i>	<i>params</i>
----------	----------	----------	-------------	---------------

Gambar 1. Format *cell card*

kompleks. Ukuran organ penyusun juga berbeda untuk setiap orang. Oleh karena itu, dalam penyusunan fantom dilakukan berbagai pendekatan agar semirip mungkin dengan kondisi tubuh sebenarnya baik dari segi bentuk, ukuran, maupun material penyusunnya.

Material penyusun fantom ORNL-MIRD hanya menggunakan tiga jenis material, yaitu tulang, paru-paru dan selebihnya dianggap sebagai jaringan lunak. Struktur material ini tentunya berbeda dengan struktur atom penyusun tubuh manusia sebenarnya. Terlebih pada kasus simulasi radioterapi kanker payudara. Payudara tersusun dari jaringan lemak atau jaringan adiposa yang memiliki daya serap yang berbeda terhadap radiasi yang diberikan dibandingkan dengan jaringan lunak.

Dalam melakukan simulasi, sel tumor atau kanker sering kali hanya diasumsikan ada di dalam payudara tanpa adanya geometri yang konkret dari sel tumor tersebut. Untuk itu, perlu dibuat sebuah rancangan penambahan sel tumor pada kasus simulasi radioterapi kanker payudara serta mengganti jaringan lunak dengan jaringan adiposa agar hasil simulasi lebih mendekati keadaan sebenarnya.

Penelitian ini bertujuan menyusun fantom model ORNL-MIRD yang sesuai dengan kebutuhan simulasi radioterapi kanker payudara. Fantom tubuh pasien kanker payudara disusun dengan menambahkan beberapa material penyusun fantom. Penambahan material ini guna mendapatkan fantom yang lebih mendekati kondisi tubuh manusia sebenarnya.

Dalam MCNPX, definisi fantom disusun dalam *cell card*, *surface card* serta *material card*. Adapun *Cell card* digunakan untuk mendefinisikan jumlah sel serta bentuk dan material penyusun dari masing-masing sel. Dalam *cell card* juga dapat didefinisikan densitas dari setiap sel yang akan disusun. Adapun format untuk *cell card* dapat dilihat pada Gambar 1.

Dimana *J* menunjukkan jumlah sel yang ingin disusun, penomoran material ditunjukkan dalam kolom *m*, *d* merupakan densitas dari masing-masing sel dalam satuan g/cm³, sedangkan *Geom* merupakan nomor permukaan atau batasan dari tiap-tiap sel dan *params* merupakan input tambahan seperti tingkat kepentingan sel.

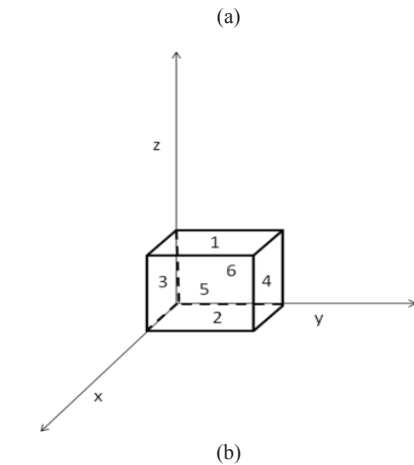
Adapun *surface card* digunakan untuk menginisiasi geometri dari masing-masing sel. Dalam *surface card* ditentukan koordinat dari masing-masing sel yang disusun sehingga tidak tumpang tindih antara satu dan lainnya. Adapun format dari *surface card* tampak pada Gambar 2.

Geometri pada *surface card* menunjukkan batasan permukaan dari setiap sel yang disusun. *J* menunjukkan penomoran dari setiap pembukaan sel, sedangkan *Geom* adalah koordinat dari setiap sel. *Geom* disusun berdasarkan

<i>J</i>	<i>Geom</i>
----------	-------------

Gambar 2. Format *surface card*

<i>C surface card</i>		
1	<i>pz</i>	0
2	<i>pz</i>	5
3	<i>py</i>	0
4	<i>py</i>	5
5	<i>px</i>	0
6	<i>px</i>	5



Gambar 3. (a) contoh input *surface card*; (b) output

jenis bangun yang diinginkan sebagai pemodelan tiap sel yang dalam kasus radioterapi mewakili bagian tubuh manusia atau fantom. Gambar 3 merupakan contoh input *surface card* untuk membentuk sebuah persegi dengan panjang rusuk 5 cm.

Adapun *material card* digunakan untuk mendefinisikan material yang menyusun setiap sel. Input material berisi struktur atom dari material penyusun setiap sel. Adapun format *material card* material dapat dilihat pada Gambar 4.

Dimana *Mn* menunjukkan penomoran material, *zaid* adalah nomor atom yang diikuti nomor massa dari isotop. Sedangkan *fraction* merupakan fraksi nuklida di dalam material yang ditunjukkan dengan + untuk kepadatan atom dan - untuk berat [4].

II. METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan sebuah software berbasis Monte Carlo yaitu MCNPX. Adapun langkah-langkah yang dilakukan adalah menyusun kode program dengan *input* pada setiap kartu. Dimulai dengan menentukan jumlah serta densitas setiap *cell* yang disusun membentuk organ tubuh manusia, menentukan batas-batas permukaan *cell*, selanjutnya menentukan material berupa struktur atom penyusun serta fraksi setiap atom.

Fantom dalam penelitian ini disusun menggunakan model ORNL-MIRD yang telah dimodifikasi dengan mengganti struktur material penyusun payudara dari jaringan lunak menjadi jaringan adiposa serta

<i>Mn</i>	<i>zaid1</i>	<i>fraction1</i>	<i>zaid2</i>	<i>fraction2</i>
-----------	--------------	------------------	--------------	------------------

Gambar 4. Format *material card*

Tabel 1. Komposisi jaringan kulit dan payudara [10]

Atom	Fraksi	
	Kulit	Adiposa
H	0,10058	0,11947
C	0,22825	0,63724
N	0,04642	0,00797
O	0,61900	0,23233
Na	0,00007	0,00050
Mg	0,00006	0,00002
P	0,00133	-
S	0,00199	0,00016
Cl	0,00134	0,00119
K	0,00199	-
Ca	0,00023	-
Fe	0,00001	-
Zn	0,00001	-

menambahkan jaringan kulit.

Adapun payudara dibuat berbentuk setengah bola dengan diameter 15 cm. Densitas payudara diasumsikan sama dengan densitas jaringan adiposa atau jaringan lemak yaitu 0,92 g/cm³ dengan volume 337 cc.

Struktur atom penyusun jaringan kulit juga dimasukkan. Kulit merupakan materi pertama yang akan menyerap radiasi yang diberikan atau disebut juga dosis permukaan. Besarnya dosis permukaan tergantung dari struktur material permukaan tubuh. Dosis ini akan mempengaruhi nilai dosis yang tersebar di dalam tubuh pasien. Mengasumsikan jaringan kulit sama dengan jaringan lunak akan memberikan nilai dosis yang berbeda.

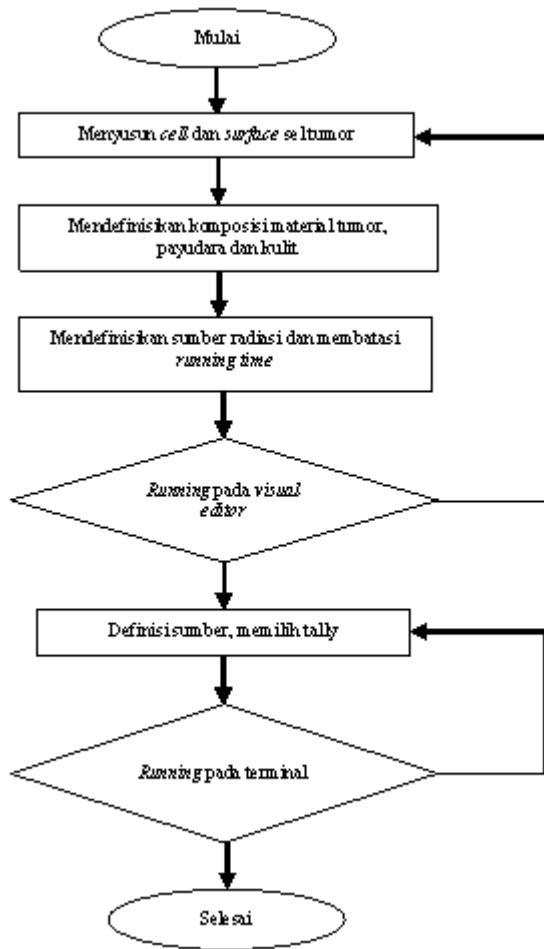
Sel tumor berbentuk bola dengan diameter 2 cm dimasukkan pada payudara sebelah kiri pada kedalaman 2,5 cm dengan struktur jaringan sama dengan jaringan lunak. Ukuran serta letak sel tumor dalam tubuh fantom kemudian dapat diatur sesuai dengan kebutuhan simulasi.

Adapun struktur atom dari material penyusun kulit dan payudara ditabulasikan pada Tabel 1.

Setelah modul fantom disusun, kode program di-*running* pada MCNP *visual editor* untuk mendapatkan gambar fantom.

Untuk mengetahui perbedaan hasil simulasi radioterapi antara fantom ORNL_MIRD dengan hasil modifikasi, dilakukan uji coba dengan menembakkan sinar- γ dari radionuklida ⁶⁰Co dengan energi 1,1732 MeV dan 1,3325 MeV yang memiliki probabilitas masing-masing sebesar 0,989 dan 0,998. Metode penyinaran yang digunakan adalah penyinaran langsung, dengan demikian sumber diletakkan pada jarak 80 cm dari permukaan tubuh fantom sejajar payudara kiri [11] (Tabel 2).

Selanjutnya dibatasi *running time* dengan menginput jumlah partikel yang disimulasi pada NPS *card* yaitu 100.000 partikel. Perhitungan dipilih menggunakan *tally F6* yang akan memberikan output dalam satuan MeV/g. Dalam dosimetri radiasi, dosis serap biasanya dihitung dalam besaran Gy atau Joule/kg sehingga pada



Gambar 5. Diagram alir modul

tally F6 diberikan faktor pengali $1,6E-10$. MCNPX memberikan output berupa deposisi energi dari satu buah partikel, sehingga untuk menghitung nilai deposisi energi sebenarnya masih harus dikalikan dengan banyaknya partikel yang keluar dari sumber yaitu sebesar $7E+9$ Bq [12]. Secara umum, langkah penyusunan modul serta uji simulasi ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 5.

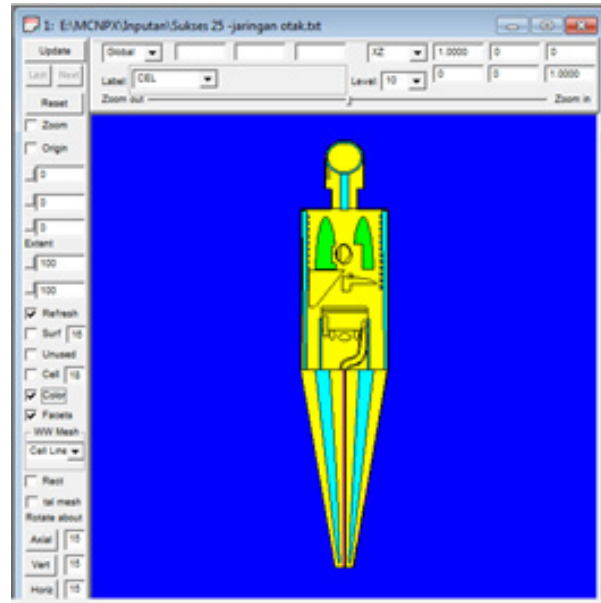
Pendefinisian sumber dilakukan menggunakan perintah SDEF dengan data input sumber ditunjukkan pada Tabel 2.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model fantom ORNL_MIRD ini dibuat semirip mungkin dengan tubuh manusia yang memuat hampir

Tabel 2. Data definisi sumber [13]

Sumber	Co60
Nomor atom	27
Nomor massa	60
Energi	1,1732 MeV dan 1,3325 MeV
Jenis partikel	Foton
Jarak sumber	80 cm
Koordinat	(8.63 -111.9552 46.87)

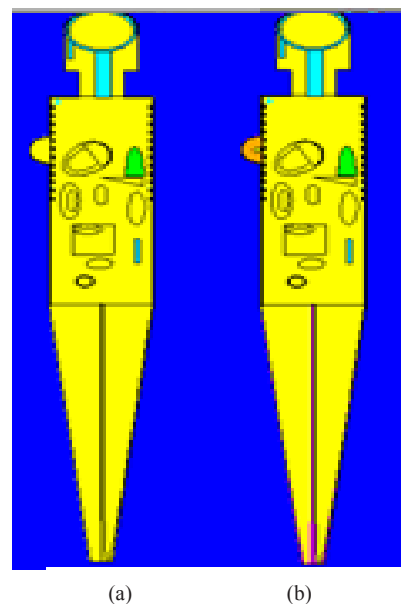


Gambar 6. Hasil running kode program pada MCNP visual editor pada sumbu XZ

semua organ penting. Organ dalam tubuh fantom dibuat dengan berbagai pendekatan baik dari segi bentuk maupun struktur atom penyusun organ. Gambar 6 menunjukkan fantom tubuh wanita hasil simulasi yang di-running pada visual editor pada sumbu XZ.

Jika dilihat dari sumbu XZ, maka tidak terlihat perbedaan yang kentara antara fantom ORNL-MIRD original dengan hasil modifikasi. Namun perbedaan mendasar dapat dilihat dari sumbu YZ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.

Perbedaan warna pada fantom menunjukkan perbedaan



Gambar 7. Hasil running kode program pada MCNP visual editor: (a) Fantom ORNL-MIRD Original, (b) Fantom hasil modifikasi. Perbedaan yang paling utama terdapat pada bagian payudara, dimana pada payudara ini tersusun dari struktur material yang berbeda (berwarna orange) serta kulit berwarna merah muda. Di dalam payudara juga terdapat tumor berdiameter 2 cm dengan kedalaman sekitar 2,5 cm.

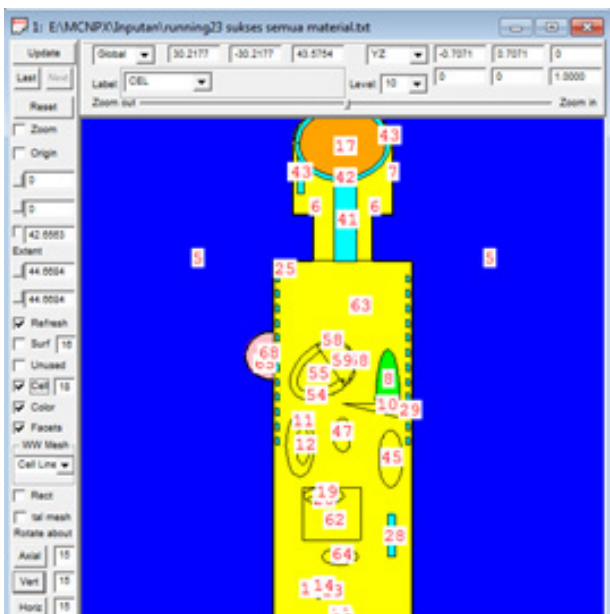
densitas organ. Dari kedua gambar tersebut dapat dilihat perbedaan antara fantom ORNL_MIRD original dengan hasil modifikasi. Pada fantom ORNL-MIRD original, seluruh tubuh fantom selain tulang (berwarna biru dengan densitas $1,4 \text{ g/cm}^3$) dan paru-paru (berwarna hijau dengan densitas $0,296 \text{ g/cm}^3$), tersusun dari jaringan lunak (berwarna kuning dengan densitas $1,04 \text{ g/cm}^3$) termasuk payudara. Sedangkan pada fantom hasil modifikasi, payudara tersusun dari struktur material yang berbeda (berwarna orange dengan densitas $0,92 \text{ g/cm}^3$) serta kulit berwarna merah muda dengan densitas $1,1 \text{ g/cm}^3$. Struktur atom penyusun jaringan kulit dan payudara didefinisikan sesuai yang ditunjukkan dalam Tabel.1.

Di dalam payudara kiri terdapat tumor dengan diameter 2 cm kiri pasien pada kedalaman sekitar 2,5 cm dengan koordinat (8.63 -9.5 46.87) ditunjukkan oleh *cell* dengan nomor 68. Adapun densitas serta atom penyusun sel tumor dianggap sama dengan jaringan lunak.

Untuk mempermudah meninjau organ dalam simulasi, semua sel diberikan penomoran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Payudara kiri sebagai organ utama yang ditinjau ditunjukkan oleh nomor 65, sedangkan sel tumor ditunjukkan oleh nomor 68.

Untuk mengetahui secara detail perbedaan fantom hasil modifikasi ini dengan fantom ORNL-MIRD original, dilakukan simulasi penyinaran sinar- γ pada kedua fantom tersebut dengan sumber diletakkan pada jarak 80 cm di depan payudara kiri.

Hasil simulasi menunjukkan perbedaan nilai laju dosis serap yang besar pada payudara kedua fantom. Pada fantom ORNL-MIRD original, nilai laju dosis serap pada payudara adalah $0,31 \text{ mGy/s}$ dengan nilai *relative error* 0,0023. Sedangkan pada fantom hasil modifikasi, laju dosis serap pada payudara adalah $0,2 \text{ mGy/s}$ dengan *relative error* 0,0023 dan laju dosis serap pada sel tumor



Gambar 8. Hasil running kode program disertai pemberian nomor untuk setiap sel. Payudara kiri sebagai organ utama yang ditinjau ditunjukkan oleh nomor 65, sedangkan sel tumor ditunjukkan oleh nomor 68

sebesar 9 mGy dengan *relative error* 0,0027. Terdapat deviasi perbedaan laju dosis serap pada payudara sebesar 36% terhadap nilai sebelum modifikasi, nilai perbedaan yang cukup besar ini selain disebabkan oleh perbedaan struktur jaringan lunak yang telah dipilih juga dikarenakan pada fantom hasil modifikasi, perhitungan dosis serap pada sel tumor dan payudara dilakukan secara terpisah. Tumor mendapatkan dosis serap sangat tinggi karena adanya faktor *build up* dimana dosis maksimum atau D_{max} tidak berada di permukaan tubuh melainkan pada kedalaman beberapa cm. Nilai dosis ini menunjukkan bahwa nilai dosis maksimum terdapat pada sel tumor. Adanya perhitungan pada tumor ini memudahkan pemberian dosis yang tepat pada sel target.

Namun jika dikalkulasikan, dengan massa payudara 360 g dan massa tumor 3 g, maka total deposisi energi radiasi pada payudara fantom original adalah 111,6 Joule sedangkan pada payudara fantom modifikasi adalah 108 Joule. Perbedaan ini menunjukkan bahwa mengasumsikan kulit dan payudara sebagai jaringan lunak akan memberikan hasil simulasi yang berbeda.

Variasi pada fantom seperti ukuran dan letak tumor dalam payudara kemudian dapat dilakukan sesuai kebutuhan *treatment* sehingga dapat memberikan hasil yang tepat sesuai kebutuhan.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan sebuah fantom tubuh yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi Monte Carlo paparan radiasi bagi pasien kanker payudara. Tumor dengan diameter 2 cm telah diletakkan pada payudara kiri fantom pada kedalaman 2,5 cm serta penambahan jaringan penyusun kulit dan payudara. Simulasi radioterapi uji coba dilakukan dengan menembakkan sinar- γ dari radionuklida ^{60}Co . Hasil simulasi menunjukkan perbedaan-perbedaan nilai sebaran dosis yang kentara dengan nilai *relative error* yang sangat kecil. Ukuran serta posisi tumor dalam fantom ini kemudian juga dapat disesuaikan dengan kebutuhan simulasi.

REFERENSI

- [1] Anonymus, International Agency For Research On Cancer, "Latest World Cancer Statistics Global Cancer Burden Rises To 14.1 Million New Cases In 2012 : Marked Increase In Breast Cancers Must Be Addressed", Press Release 223, 2013.
- [2] D. Barsasella, *Fisika untuk mahasiswa kesehatan*, Jakarta, Indonesia: Trans Info Media, 2010.
- [3] A. Rizani, W. S. Budi, dan C. Anam, "Simulasi Monte Carlo untuk Menentukan Dosis Sinar-X 6 MV pada Ketidakhomogenan Medium Jaringan Tubuh", *Berkala Fisika*, vol. 15, No.2, pp. 49-56, 2012.
- [4] A. D. Lazarine, "Medical Physics Calculation with MCNPTM: A Primer", *A Thesis*, Texas A&M University, Texas, 2006.
- [5] R. Kurniawan, V. Gunawan, dan C. Anam, "Koreksi Kurva Isodosis 2D untuk Jaringan Non Homogen Menggunakan Metode TAR (Tissue air Ratio)", *Youngster Physics journal*, vol 3, pp. 227-234, 2014.

- [6] J. K. Shultis, and R. E. Faw, *An MCNP Primer*, Manhattan: Kansas State University, 2011.
- [7] D. Krstic, and D. Nikezic, "Conversion coefficients for Age Dependent ORNL Phantoms from ^{137}Cs in Soil as a Source of External Exposure", *Nuclear Instruments and Methods A*, Vol. 580, No. 1, pp. 540-543, 2007.
- [8] D. Krstic, and D. Nikezic, "External Doses in Humans from ^{137}Cs in Soil", *Health Physics*, Vol. 91, No. 3, pp. 249-257, 2006.
- [9] D. Krstic, and D. Nikezic, "Input Files with ORNL-Mathematical Phantoms of The Human Body for MCNP-4B", *Computer Physics communications*, Vol. 176, No. 1, pp. 33-37, 2007.
- [10] H. O. Tekin, V. P. Singh, E. E. Altunsoy, T. Manici, and M. I. Sayyed, "Mass Attenuation Coefficient of Human Body Organs Using MCNPX Monte Carlo Code", *Iranian Journal of Medical Physics*, Vol. 14, pp. 229-240,
- [11] M. Mathuthu, N. W. Mdziniso, and Y. H. Asres, "Dosimetric Evaluation of Cobalt-60 Teletherapy in Advanced Radiation Oncology", *Journal of Radiotherapy in Practice*, Vol. 18, No. 1, pp. 88-92, 2018.
- [12] R. A. Redd, "Radiotherapy Dosimetry Physics Calculation Using MCNP5", *A Thesis*, Texas A&M University, Texas, 2003
- [13] M. Aziz, E. Hidayanto, dan D. D. Lestari, "Penentuan Aktivitas ^{60}Co Dan ^{137}Cs pada Sampel *Unknown* Dengan Menggunakan Detektor Hpge" *Youngster Physics Journal*, Vol. 14, No.2, pp. 189 -196, 2015.

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

