

Optimasi Sudut Dalam Penentuan Distribusi Dosis Dengan Metode Simulated Annealing

Devi Nurhanivah^{1,a)}, Rena Widita^{1,b)}

¹Laboratorium Biofisika,
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} devinurhanivah@gmail.com

^{b)} rena@fi.itb.ac.id

Abstrak

Radioterapi masih menjadi cara efektif untuk pengobatan kanker. Tujuan radioterapi yaitu memaksimalkan dosis pada target kanker dan meminimalkan dosis pada organ sehat disekitar target. Terdapat beberapa tahapan dalam proses radioterapi diantaranya pengambilan citra, treatment planning system, simulasi, verifikasi, dan terapi. Dalam ranah fisika medis yang menentukan radioterapi mencapai tujuan tersebut terletak pada sistem perencanaannya atau biasa disebut dengan treatment planning system (TPS). TPS biasanya terdiri dari penentuan distribusi dosis, margin atau volume target, lamanya penyinaran dan homogenitas jaringan. Penentuan distribusi dosis menjadi salah satu yang penting dilakukan untuk verifikasi dosis. Ada kalanya suatu proses TPS tidak sesuai yang diharapkan, dikarenakan adanya suatu penyimpangan baik sistematis maupun penyimpangan acak, seperti pergerakan organ, hal ini dapat menyebabkan pergeseran distribusi dosis. Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini akan dibahas mengenai optimasi sudut penyinaran dalam penentuan distribusi dosis menggunakan metode simulated annealing. Dalam metode simulated annealing ini melibatkan suatu fungsi objektif, yang mengevaluasi sudut dan dosis agar hasil yang diperoleh optimal yaitu dengan meminimumkan nilai fungsi objektif. Selanjutnya, hasil distribusi dosis tersebut dibandingkan dengan distribusi dosis hasil dari TPS standar yang diperoleh dari percentage depth dose (PDD) dan profile dose (OA). Sehingga, distribusi dosis yang diperoleh dengan evaluasi metode simulated annealing diharapkan lebih baik dibandingkan dengan TPS standar.

Kata-kata kunci: Distribusi Dosis, Dosis Profile, Fungsi Objektif, PDD, Simulated Annealing, TPS

PENDAHULUAN

Radioterapi merupakan terapi yang menggunakan radiasi dengan energi radioaktif atau energi pion sebagai sumbernya ditujukan untuk mengobati penyakit kanker dan mengurangi rasa sakit akibat suatu kanker yang sudah dinyatakan stadium akut. Dalam proses pengobatan, radioterapi tidak berjalan sendiri, melainkan diikuti dengan bedah, kemoterapi atau imunoterapi yang disesuaikan dengan tingkatan kanker yang diderita pasien. Pada proses radioterapi diperlukan sebuah perencanaan untuk menentukan beberapa parameter yang biasanya dilakukan sebelum radioterapi yang disebut dengan Treatment Planning System (TPS). TPS adalah bagian dari proses radioterapi dimana kegiatan TPS harus dilakukan terlebih dahulu sebelum proses terapi dijalankan. Menurut International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) 50 (ICRU50,1937), proses TPS mencakup beberapa hal yang harus diperhatikan oleh fisikawan medis, yaitu penentuan kontur tubuh, penentuan margin atau volume target, penentuan distribusi dosis radiasi yang diberikan, penentuan lamanya penyinaran dan penentuan homogenitas jaringan. Selain menentukan beberapa parameter, TPS juga mencakup simulasi, akuisisi citra oleh CT, mengatur konfigurasi berkas yang cocok, serta menentukan besarnya energi yang digunakan untuk meradiasi. Hal ini dilakukan agar mencapai tujuan dari radioterapi, yaitu memaksimalkan dosis pada target, meminimalkan dosis pada organ disekitar target. Adakalanya dalam proses radioterapi terjadi beberapa kesalahan diantaranya kesalahan sistematis dan kesalahan acak. Kesalahan sistematis ini terjadi selama persiapan terapi yang akan berdampak pada kesalahan saat terapi berlangsung.

Sedangkan, kesalahan acak biasanya disebabkan karena pengaturan harian pada variasi posisi target akibat pergerakan organ, biasanya kesalahan ini terjadi pada saat proses terapi berlangsung. Akibatnya, pada saat praktek berlangsung tidak sesuai dengan perencanaan. Itu semua dapat dihindari dengan melakukan optimasi untuk

mencapai hasil yang terbaik untuk perencanaan treatment pasien. Salah satu metode yang digunakan untuk optimasi dalam TPS yaitu metode Simulated Annealing (SA). Metode ini biasanya digunakan dalam proses metalurgi, namun dapat digunakan juga dalam proses radioterapi. Metode ini bertujuan untuk mendapatkan global minimum dari suatu fungsi objektif dengan memperhitungkan bobot sinar radiasi. Telah banyak yang melakukan riset mengenai optimasi dengan menggunakan metode SA, salah satunya (*Webb,1989*) yang mengaplikasikan perencanaan konformal 3D. Oleh karena itu, dalam studi ini akan dibahas lebih lanjut mengenai aplikasi metode Simulated Annealing pada proses optimasi TPS dalam hal distribusi dosis dan membandingkan distribusi dosis tersebut dengan distribusi dosis pada TPS standar. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini yaitu mengaplikasikan metode Simulated Annealing pada proses optimasi Treatment Planning System (TPS) kemudian membandikannya dengan TPS standar.

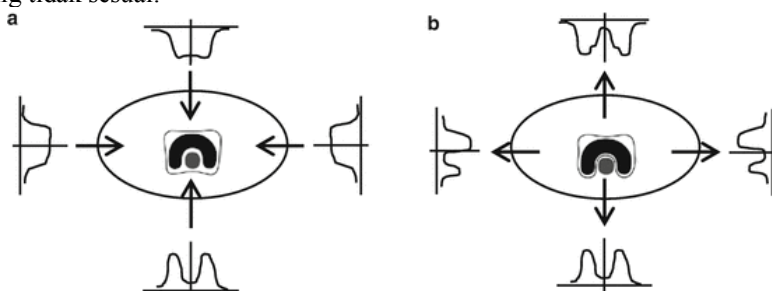
TINJAUAN PUSTAKA

Radioterapi

Radioterapi adalah salah satu pengobatan yang paling efektif untuk mengobati kanker dengan menggunakan radiasi ionisasi, contohnya sinar-X, sinar- γ , atau juga dengan menggunakan radioaktif sebagai sumbernya. Radioterapi merupakan suatu pengobatan yang menggunakan dosis yang tinggi untuk membunuh sel kanker dan menghentikan persebarannya. Perbedaan prinsip pada pengobatan radioterapi adalah teknik pemberian dan tujuan ter-*api*. Berdasarkan teknik pemberiannya, dikenal radiasi eksternal dan radiasi internal atau brakhiterapi. Radiasi eksternal yaitu sumber radiasi yang diberikan memiliki jarak yang cukup jauh dengan targetnya, sedangkan brakhiterapi menggunakan sumber radiasi yang diletakkan dekat dengan target. Kegunaan radiasi eksternal adalah untuk meradiasi kanker dan perluasannya, sedangkan brakhiterapi meradiasi dengan dosis tinggi khususnya pada servik dan uterus, untuk melindungi organ-organ penting disekitarnya (buli, rektum dan usus halus) sehingga brakhiterapi lebih dimanfaatkan untuk radiasi tambahan setelah radiasi eksternal atau diberikan di antara radiasi eksternal. Berdasarkan tujuannya, terapi dalam radioterapi ini memiliki sifat kuratif dan paliatif. Ra-dioterapi bersifat kuratif ditujukan untuk mengobati penyakit kanker pada stadium awal. Sedangkan radioterapi bersifat paliatif yaitu ditujukan untuk mengurangi gejala akibat kanker yang sudah dinyatakan stadium lanjut. Hal ini disesuaikan dengan diagnosis dan pemeriksaan berkala yang dilakukan oleh dokter.

Optimasi Treatment Planning System (TPS)

Dalam proses radioterapi terdapat beberapa tahapan sebelum dilakukannya terapi pada pasien, pertama pasien melakukan pengambilan citra dengan menggunakan CT Scan atau alat diagnosis lain untuk mendapatkan informasi berupa letak, bentuk, dan ukuran dari target. Tahapan selanjutnya adalah Treatment Planning System (TPS), dalam tahapan ini dibantu oleh fisikawan medis untuk menentukan dosis yang harus dihantarkan ke target, menentukan seberapa besar margin atau daerah yang harus disinari radiasi, dan menentukan lamanya radiasi. Untuk memastikan TPS sesuai, dilakukannya simulasi terlebih dahulu dan verifikasi apabila dalam perencanaan yang dibuat ada yang tidak sesuai.



Gambar 1 (a) Teknik Forward Planning, (b) Teknik Inverse Planning (*ICRU 83*)

Menurut *Barret and et al,2009* teknik dalam TPS ada dua jenis, yaitu forward planning dan inverse planning. Pada forward planning, perencanaan yang telah mengetahui arah beam, energi dan profil beam sehingga dihasilkan distribusi dosis. Optimasi dosis pada forward planning berlangsung secara trial and error, apabila belum mendapatkan distribusi dosis yang sesuai maka dilakukan pengulangan perhitungan dengan parameter masukkan yang berbeda. Sedangkan, inverse planning merupakan perencanaan dengan menggunakan pa-rameter distribusi dosis yang optimal, arah beam, energi dan profil beam dengan mengetahui distribusi dosis yang

diinginkan. Seperti yang dikemukakan oleh *Webb,1989* bahwa salah satu teknik yang digunakan dalam inverse planning yaitu teknik iteratif dengan menggunakan algoritma pemrograman seperti Simulated Annealing.

Simulated Annealing

Berdasarkan penelitian dari (*Kirkpatrick et al.,1983*) menjelaskan mengenai optimasi menggunakan Simulated Annealing (SA). SA adalah suatu metode optimasi yang berdasarkan pada proses pendinginan yang digunakan dalam Metalurgi. Secara umum, pada saat suatu zat melewati proses pendinginan, pertama-tama akan dipanaskan dulu sampai mencapai titik lebur untuk pencairannya, kemudian didinginkan secara perlahan-lahan dengan cara mengontrol proses pendinginannya hingga zat tersebut padat kembali.

Dalam proses annealing ada beberapa tahap yang terjadi dalam pendinginan logam. Pada temperatur tinggi, atom-atom yang berada dalam logam yang dipanaskan tersebut berorientasi acak dan mempunyai energi yang sangat tinggi. Ketika temperatur diturunkan, atom-atom akan cenderung untuk mengikuti arah atom tetangganya. Namun daerah yang berbeda akan memiliki arah yang berbeda pula. Jika temperatur sudah sangat rendah, maka terjadi proses pembekuan sehingga atom-atom tersebut akan berikatan erat, memiliki energi yang sangat rendah dan memiliki arah yang satu dengan yang lain. Oleh karena itu, dalam proses an-nealing dapat dianalogikan dengan proses radiasi. Pada saat proses radiasi, partikel-partikel akan bergerak secara acak hingga mencapai target dengan energi yang sangat tinggi, ketika partikel mengenai target maka energi partikel akan cenderung turun.

Dalam proses *simulated annealing* terdapat suatu komponen penting yang sangat berpengaruh yaitu fungsi objektif dari suatu kasus tertentu. Proses *simulated annealing* melakukan suatu pencarian suatu nilai secara acak yang mengakibatkan fungsi objektif bersifat optimum. Metode *simulated annealing* pada dasarnya mengadopsi prinsip termodinamika Boltzmann yang menyatakan hubungan antara probabilitas suatu sistem yang ditunjukkan dengan persamaan berikut,

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta F}{T}\right) \tag{1}$$

ΔF merupakan kenaikan fungsi objektif dan temperatur T . Temperatur berangsur-angsur turun secara eksponensial. Menurut *Pugacev et al, 2001*, ketika suhu perlahan menurun, probabilitas menerima konfigurasi percobaan dengan fungsi objektif yang lebih tinggi akan berkurang. Suhu awal dipilih menjadi lebih tinggi dari nilai terbesar dari fungsi objektif dihitung secara acak. Suhu berhenti ditentukan dengan memantau fungsi objektif sebagai fungsi dari perubahan suhu. Perbedaan di dalam fungsi objektif antara beberapa temperatur seharusnya berhenti saat sistem mencapai optimal.

Telah diturunkan fungsi objektif untuk mengoptimasi orientasi berkas yang berpengaruh dalam perhitungan distribusi dosis yang dipaparkan oleh *Bortfeld et al, 1991*, dapat dilihat dalam persamaan berikut,

$$F = \int \int [D_i(x, y) - D_i^p(x, y)]^2 dx dy = \min! \tag{2}$$

Dengan D_i merupakan dosis yang diterima pada voxel ke- i , D_i^p merupakan dosis yang direncanakan pada saat TPS. Dalam hal ini nilai fungsi objektif harus bernilai minimum, agar dosis yang diterima sama dengan dosis yang direncanakan.

Selanjutnya dengan menggunakan tranformasi Fourier diskrit dan memasukkan beberapa syarat batas dapat diperoleh fungsi objektif sebagai berikut,

$$F = \int \int [D_i(w, \theta) - D_i^p(w, \theta)]^2 w dw d\theta = \min! \tag{3}$$

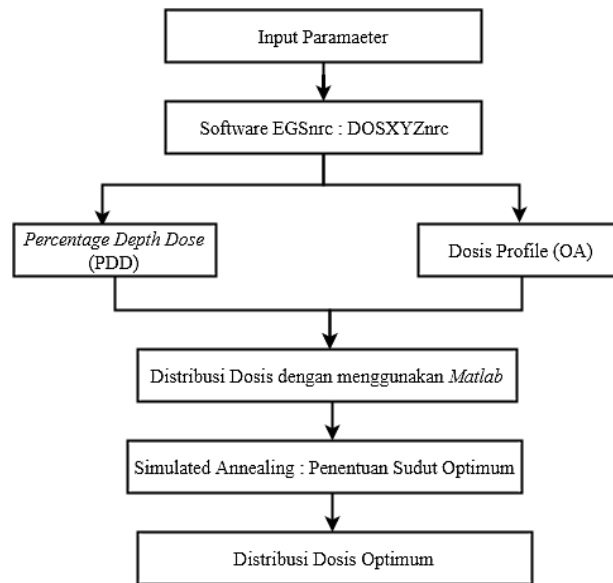
Atau dapat disederhanakan oleh *Pugacev, et al, 2001* menjadi,

$$F = \sum_i w_i (D_i - D_i^p)^2 \tag{4}$$

Dan w_i adalah faktor bobot berkas radiasi.

METODOLOGI PENELITIAN

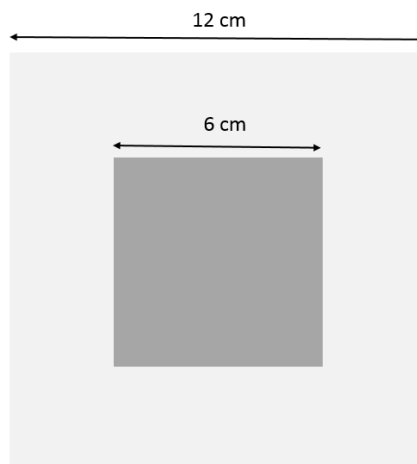
Dalam studi ini terdiri dari tiga tahap pengerjaan. Pertama menentukan distribusi dosis dilakukan dengan cara permodelan kurva isodosis dengan menggunakan Matlab. Dosis yang diperoleh selanjutnya ditransformasi fourier agar bergantung sudut. Tahap terakhir, untuk mendapatkan sudut dan distribusi dosis yang optimal dievaluasi dengan metode Simulated Annealing. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada diagram alir berikut,



Gambar 2. Alur Penelitian

Software EGSnrc

Software Electron Gamma Shower (EGS) merupakan software berbasis algoritma Monte Carlo yang mensimulasikan transport elektron dan foton. EGSnrc ini dibagi menjadi dua bagian, yakni BEAMnrc dan DOSXYZnrc. BEAMnrc berfungsi memodelkan sumber radioterapi, sedangkan DOSXYZnrc adalah bagian dari EGSnrc yang berfungsi untuk menghitung distribusi dosis dalam voxel phantom berbentuk bujur sangkar. Untuk mengolah data output dari DOSXYZnrc ini digunakan statdose menghasilkan Percentage Depth Dose (PDD) dan Profile Dose (OA) yang digunakan pada penelitian ini. Penggunaan nilai PDD dan OA dari hasil simulasi ini bertujuan untuk mendapatkan persebaran dosis secara vertikal dan lateral sebagai informasi penting dalam pembuatan distribusi dosis.



Gambar 3. Perencanaan dalam pemodelan

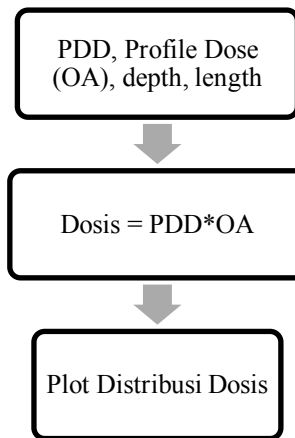
Input parameter yang digunakan dalam DOSXYZnrc mencakup ukuran phantom, sumber radiasi dan jumlah partikel. Dalam mendefinisikan ukuran phantom dibutuhkan ketentuan target penyinaran berukuran 6 cm x 6 cm, medan lapangan penyinaran yang digunakan 12 cm x 12 cm dengan besarnya voxel 0.5 cm dan media yang digunakan adalah H2O521ICRU sebagai organ disekitar target dan ICRUTISSUE521IC sebagai target seperti pada Gambar 3. Selanjutnya, sumber radiasi yang digunakan berupa foton dengan energi sebesar 10 MV dan tipe sumber berupa berkas foton parallel. Jumlah partikel yang digunakan sebanyak 300.000.000 partikel. Apabila

semua parameter telah diinputkan ke software DOSXYZnrc selanjutnya dilakukan compile dan run, sehingga diperoleh data .3ddose yang selanjutnya akan diolah menggunakan statdose sehingga menghasilkan nilai PDD dan OA.

Permodelan Kurva Isodosi

Pada tahapan ini dilakukan permodelan mengenai kurva isodosi. Awalnya, digunakan data PDD dan data dosis profil diperoleh dari simulasi menggunakan software EGSnrc. Selanjutnya, dilakukan perkalian antara nilai PDD di kedalaman tertentu dengan nilai profil dosis di suatu titik tertentu menghasilkan dosis di titik tertentu $D(x,z)$ seperti pada persamaan (5). Nilai dari setiap titik dosis tersebut akan dihubungkan membentuk suatu kurva yang disebut dengan kurva isodosi.

$$D(x, z) = OA(x) \times PDD(z) \tag{5}$$



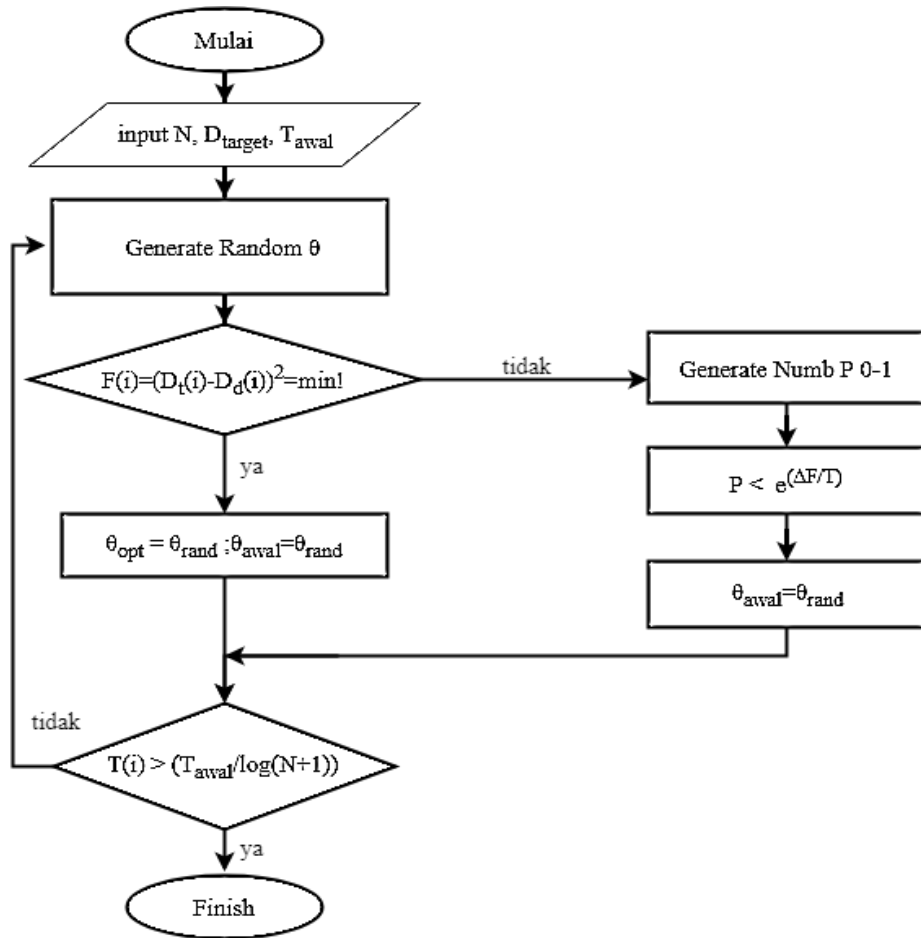
Gambar 4. Flowchart pembuatan kurva isodosi

Evaluasi Distribusi Dosis dengan Simulated Annealing

Optimasi *Treatment Planning System* untuk mengevaluasi distribusi dosis dilakukan dengan mengaplikasikan metode *simulated annealing*. Langkah pertama dengan memberikan nilai masukan yaitu berupa nilai bobot awal w_{awal} , T_{awal} dan distribusi dosis yang diperoleh dari tahap sebelumnya. Selanjutnya, dilakukan perhitungan dosis perencanaan dengan menggunakan persamaan berikut,

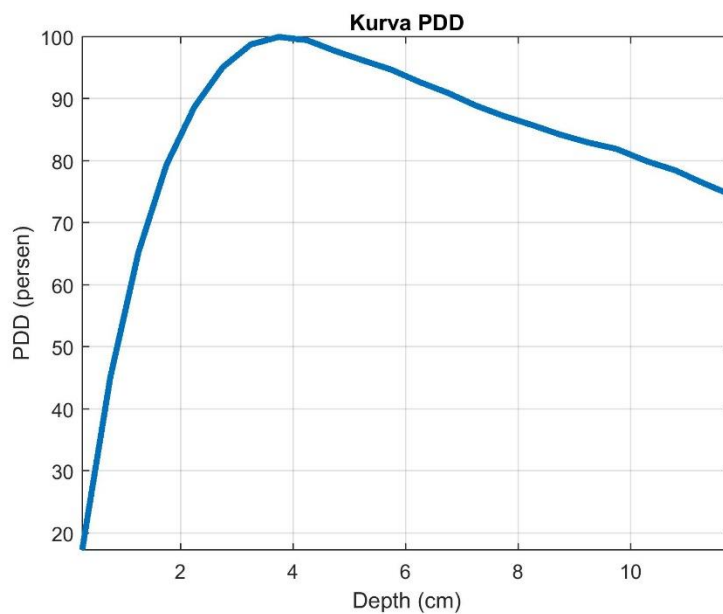
$$D_p(i) = \sum D_t(i) \cdot e^{-\mu d} \tag{6}$$

Dengan μ merupakan koefisien atenuasi ($\mu = 0.04/\text{cm}$ untuk energi radiasi 10 MV) dan d adalah kedalaman target dari permukaan. Kemudian melakukan proses random untuk nilai bobot dengan rentang 0-1. Lalu dengan memanfaatkan persamaan (5) untuk menghitung dosis perencanaan, apabila fungsi objektif bersifat minimum maka proses akan langsung berlanjut ke perhitungan temperature T dengan memanfaatkan jumlah iterasi yang diperlukan dalam penelitian ini dilakukan 1000 iterasi. Namun apabila nilai fungsi objektif tidak bernilai minimum, maka proses berlanjut dengan memperhitungkan probabilitas penerimaan dengan menggunakan persamaan (1), apabila nilai bobot random kurang dari probabilitas penerimaan maka proses dapat berlanjut. Untuk lebih jelasnya lagi dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 5.

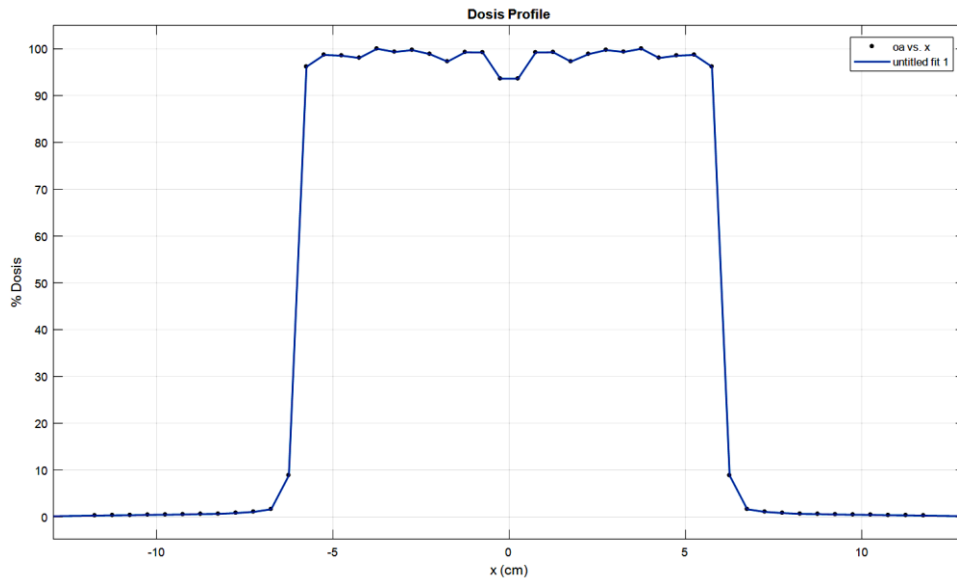


Gambar 5 Flowchart evaluasi distribusi dosis dengan Simulated Annealing

HASIL PENELITIAN



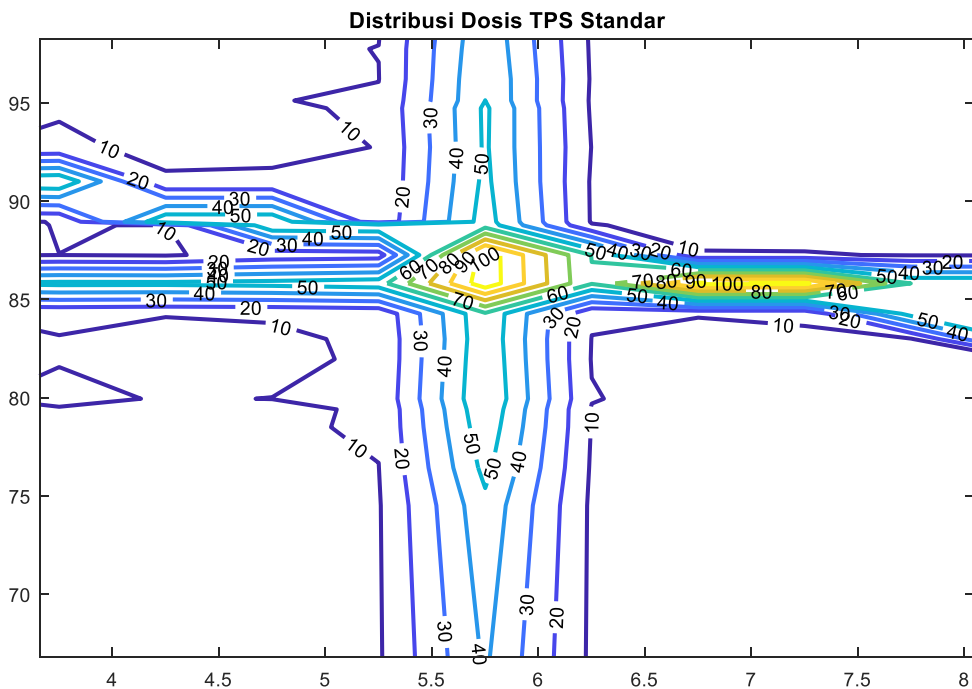
Gambar 6. Kurva Persentase Dosis Terhadap Kedalaman oleh TPS Standar



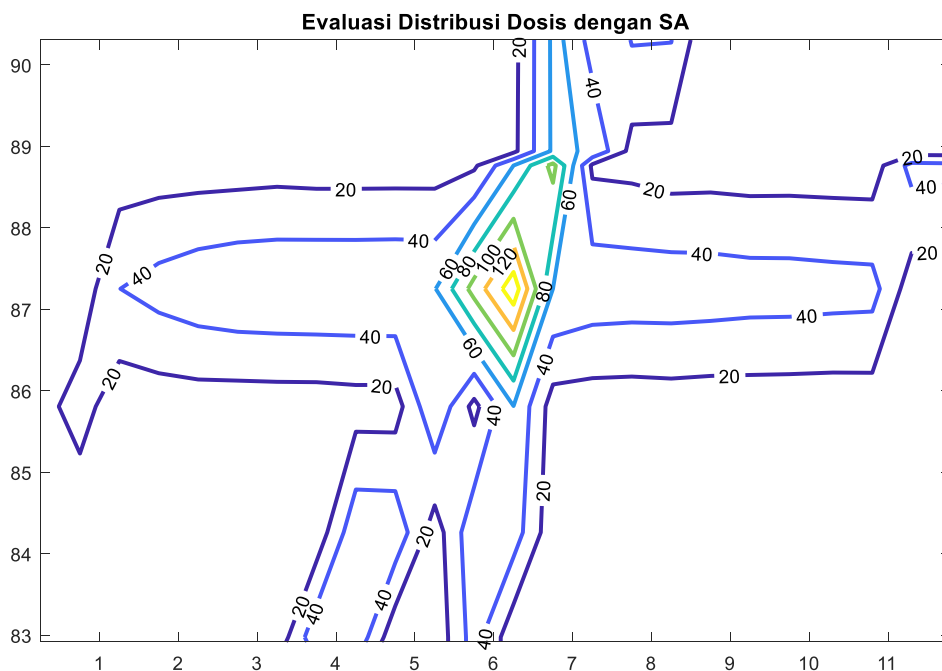
Gambar 7. Kurva Dosis Profil oleh TPS Standar

Berdasarkan hasil yang diperoleh, terlihat pada Gambar 6 merupakan kurva persentase dosis terhadap kedalaman, ditunjukkan bahwa sudah sesuai dengan referensi. Untuk energi 10 MV yang menerima dosis 100% terletak pada kedalaman 3.75 cm. Dalam rentang 0cm – 3.75 cm dosis yang diterima tidak maksimum, hal ini dikarenakan adanya efek build up. Apabila dibandingkan dengan referensi *Wolbrast, et all 2006*, kedalaman maksimum untuk berkas foton 10 MV sebesar 2.83 cm. Terdapat perbedaan yang cukup jauh antara penelitain dengan referensi, hal ini dikarenakan jumlah voxel yang digunakan cukup besar.

Dalam TPS standar juga diperlukan data dosis profile yang ditunjukkan dengan Gambar 7. Dosis profile menunjukan bentuk muka sinar terhadap penampang lintang permukaan target.



Gambar 8. Kurva Distribusi Dosis oleh TPS Standar



Gambar 9. Kurva Distribusi Dosis dengan metode Simulated Annealing

Selanjutnya, untuk menentukan distribusi dosis untuk TPS standar dilakukan perhitungan dari perkalian antara PDD dan OA, kemudian dengan permodelan menggunakan Matlab untuk tiga sudut penyinaran yang ditetapkan secara langsung yaitu arah 0° , 90° dan 270° . diperoleh hasil kurva distribusi dosis seperti pada Gambar 8. Terlihat bahwa dosis target melebihi dari yang sudah direncanakan diawal yaitu sekitar 100% hanya saja organ disekitar target pun akan menerima dosis yang cukup besar. Seperti yang ditunjukkan pada gambar terlihat bahwa disekitar target menerima dosis 100% juga, ini akan menyebabkan kerusakan pada organ sehat disekitar target kanker.

Tinjau distribusi dosis yang dievaluasi dengan metode Simulated annealing, yaitu dengan melibatkan tiga sudut penyinaran secara random kemudian dioptimasi menghasilkan sudut 54° , 87° , dan 200° yang mempunyai nilai fungsi objektif minimum. Terlihat bahwa dosis yang diterima target melebihi dari anjuran ICRU 50 yaitu sekitar 95%, pada kasus ini dosis yang diterima target sekitar 120%. Walaupun demikian, tidak seperti distribusi dosis yang dihasilkan oleh TPS standar, distribusi dosis yang telah dievaluasi dengan metode simulated annealing ini tidak memberikan dosis yang besar disekitar target, dengan kata lain dengan menggunakan metode ini organ disekitar target aman.

KESIMPULAN

Metode Simulated Anealing dapat mengoptimasi jumlah dan orientasi sudut penyinaran agar memperoleh distribusi dosis yang optimum pada target dan minimum pada OAR. Terbukti pada penelitian ini, distribusi dosis pada target dengan menggunakan metode Simulated Annealing 120% walaupun tidak sesuai dengan aturan ICRU 50, dengan metode ini dapat memperkecil kemungkinan kerusakan pada organ disekitar target kanker. Oleh karena itu, distribusi dosis lebih optimum dihasilkan dari metode Simulated Annealing dibandingkan dengan TPS Standar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Makalah ini didanai oleh BKM Prodi Fisika ITB.

REFERENSI

- Barret, A. and et al (2009). Practical radiotherapy planning. fourth edition. hodder arnold uk company.
- Bortfeld, T. and Schlegel, W. (1993). Optimization of beam orientations in radiation therapy: some theoretical considerations. *Physics in Medicine, Biology*.
- ICRU 35 (1985). International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 50. Prescribing, recording and reporting photon beam therapy, Bethesda MD: ICRU.
- ICRU 50 (1937). International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 50. Prescribing, recording and reporting photon beam therapy, Bethesda MD: ICRU.
- Khan, F. (2010). *The Physics of Radiation Therapy*, Forth Editione. Department of Thera-peutic Radiology, University of Minnesota Medical School, Minneapolis, Minnesota.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*.
- Macovski, A. (1983). *Medical Imaging System*. Prentice-Hall.
- Pugachev, A., Jonathan, G., Boyer, A., Hancock, S., Le, Q.-T., Danaldson, S., and Xing, L. (2001). Role of beam orientation optimization in intensity-modulated radiation therapy. *J. Radiation Oncology Biol. Phys*, 40(2):551–560.
- Webb, S. (1989). Optimisation of conformal radiotherapy dose distribution by simulated annealing. *Physics in Medicine and Biology*.
- Wolbarst, AB. et al. (2006). *Advance in Medical Physics 2006*. Medical Physics Publishing
- ICRU 83 (2010). International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report 83. Prescribing, recording and reporting photon beam therapy, Bethesda MD: ICRU.