Distribusi Dosis dan Kemunculan Puncak Compton di Kedalaman Dangkal pada Penembakan Proton terhadap Air menggunakan Simulasi Monte Carlo

Gusti Atika Urfa 1[a], Eka Suarso 2[a] , Totok Wianto 3[a]

[a]Universitas Lambung Mangkurat

Email korespondensi: gusti.urfa@ulm.ac.id

ABSTRAK

Simulasi Monte Carlo *telah dilakukan dengan memborbardir material air menggunakan partikel proton dengan energi yang bervariasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati sifat dan karakteristik proton ketika berinteraksi dengan air, yang merupakan komponen utama tubuh manusia. Fantom air yang digunakan dalam simulasi memiliki dimensi silinder dengan radius 10 cm dan panjang 50 cm. Hasil simulasi menunjukkan distribusi dosis kedalaman untuk proton dengan energi berkisar antara 40 – 300 MeV, dengan posisi puncak Bragg untuk energi-energi tersebut berada dalam rentang 0,5 hingga 50 cm, sesuai dengan data referensi dari NIST. Selain itu, penelitian ini mengidentifikasi distribusi gamma sekunder dan munculnya puncak Compton pada proton dengan energi di atas 260 MeV). Pembentukan partikel sekunder dalam proses penembakan proton pada air sangat penting untuk memahami dosis radiasi yang diterima selama prosedur terapi proton.*

Kata kunci: Monte Carlo, Proton, Gamma Sekunder, Puncak Compton

PENDAHULUAN

Terapi proton adalah salah satu metode radioterapi eksternal yang saat ini sedang berkembang pesat dan digunakan untuk pengobatan tumor ganas maupun jinak. Metode ini menawarkan keunggulan dalam hal distribusi dosis yang lebih terokus pada tumor, dengan meminimalisasi dosis pada jaringan sehat di sekitarnya (Press & Mehta, 2024). Keunggulan ini disebabkan oleh karakteristik fisik proton yang memiliki puncak Bragg (Bragg peak), dimana energi proton dominan dilepaskan pada titik tertentu dalam jaringan, menghasilkan dosis maksimum pada kedalaman tertentu, bergantung pada energi proton yang ditembakkan. Hal ini memungkinkan perencanaan pengiriman radiasi yang lebih rendah pada jaringan normal daripada yang terjadi pada terapi konvensional menggunakan foton (Lane et al., 2023).

Dalam aplikasi terapi kanker menggunakan proton, air sering digunakan sebagai model atau fantom untuk mensimulasikan interaksi radiasi dengan tubuh manusia, karena sekitar 70% tubuh manusia terdiri dari air. Oleh karena itu, memahami interaksi proton

dengan air sangat penting untuk mengoptimalkan parameter klinis dalam terapi proton dan untuk meminimalkan efek samping yang mungkin terjadi (Gargett et al., 2020).

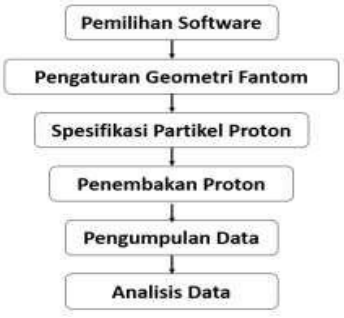
Meskipun manfaat dari terapi proton telah diakui secara luas, masih ada tantangan yang perlu diatasi terkait dengan distribusi dosis radiasi dan pembentukan radiasi sekunder. Distribusi dosis yang tidak tepat dapat menyebabkan kerusakan pada jaringan sehat atau *Organ at Risk* (OAR), selain itu radiasi sekunder dapat menambah dosis yang tidak diinginkan pada pasien(Boer et al., 2022). Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami secara mendalam sifat dan karakteristik proton ketika berinteraksi dengan air, serta distribusi dosis dan pembentukan radiasi sekunder yang dihasilkan (Dwi Fianto et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis sifat dan karakteristik partikel proton ketika berinteraksi dengan air melalui simulasi Monte Carlo. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan berbagai energi proton untuk mengamati distribusi dosis kedalaman dan identifikasi radiasi sekunder yang terbentuk. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk menentukan distribusi dosis kedalaman untuk proton dengan energi antara 40 – 300 MeV, mengidentifikasi posisi puncak Bragg untuk berbagai energi proton dan menganalisis munculnya puncak Compton pada penembakan proton dengan energi di atas 260 MeV.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai distribusi dosis dan pembentukan radiasi sekunder dalam terapi proton, yang pada dasarnya dapat meningkatkan efektivitas dan keamanan prosedur terapi ini.

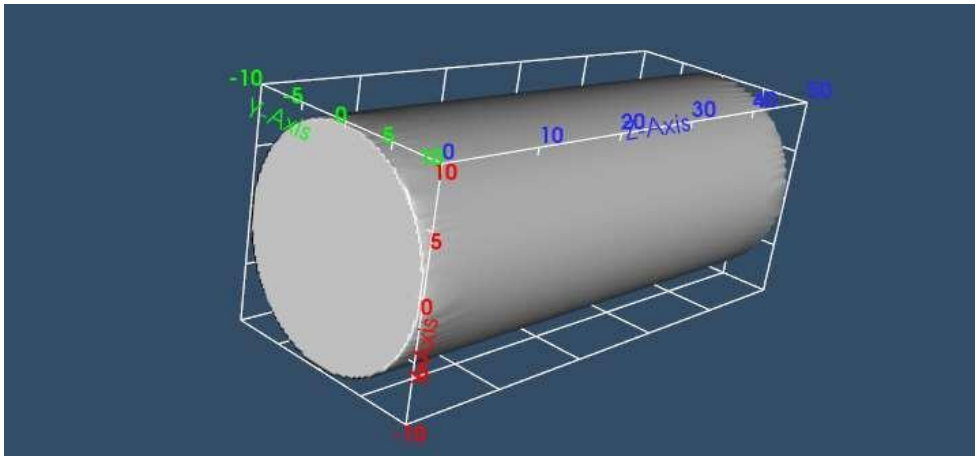
METODE PENELITIAN

Peneltian ini menggunakan metode simulasi Monte Carlo dengan software PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) versi untuk memodelkan interaksi proton dengan material air. Simulasi ini dilakukan untuk mengamati distribusi dosis kedalaman, posisi puncak Bragg serta pembentukan radiasi sekunder saat proton dengan berbagai energi ditembakkan ke dalam medium air (Sato et al., 2018). Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir prosedur penelitian

Simulasi dilakukan menggunakan software PHITS 3.28, yang dikenal mampu melakukan simulasi transportasi partikel dan radiasi dengan tingkat akurasi tinggi. Kemudian dilakukan pengaturan geometri fantom dimana fantom yang digunakan dalam simulasi berbentuk silinder dengan panjang 50 cm dan radius 10 cm, yang berisikan material air, seperti pada Gambar 2. Geometri fantom ini ditentukan dalam input file PHITS sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Fantom yang telah disetting, diletakkan pada area kerja PHITS kemudian ditembaki oleh partikel proton. Spesifikasi partikel proton yang digunakan dalam simulasi adalah proton dengan variasi energi dari 40 – 300 MeV dengan range 20 MeV. Partikel proton tersebut ditembakkan dengan jarak 10 cm dari fantom air. Jumlah partikel proton yang ditembakkan untuk setiap simulasi adalah 100.000 partikel. Proton ditembakkan melalui penampang lingkaran fantom air dengan arah tegak lurus terhadap permukaan silinder. Posisi penembakan proton diatur sedemikian rupa agar partikel mengenai bagian tengah penampang lingkaran fantom.



Gambar 2. Geometri fantom yang digunakan pada software PHITS

Data yang dihasilkan meliputi distribusi dosis kedalaman, posisi puncak Bragg dan terbentuknya puncak Compton. Untuk memastikan keakuratan hasil simulasi, distribusi dosis kedalama yang dihasilkan dibandingkan dengan data referensi yang tersedia dari NIST (National Institute of Standars and Technology). Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa simulasi yang dilakukan telah mencerminkan kondisi fisik yang sesungguhnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Posisi Puncak Bragg

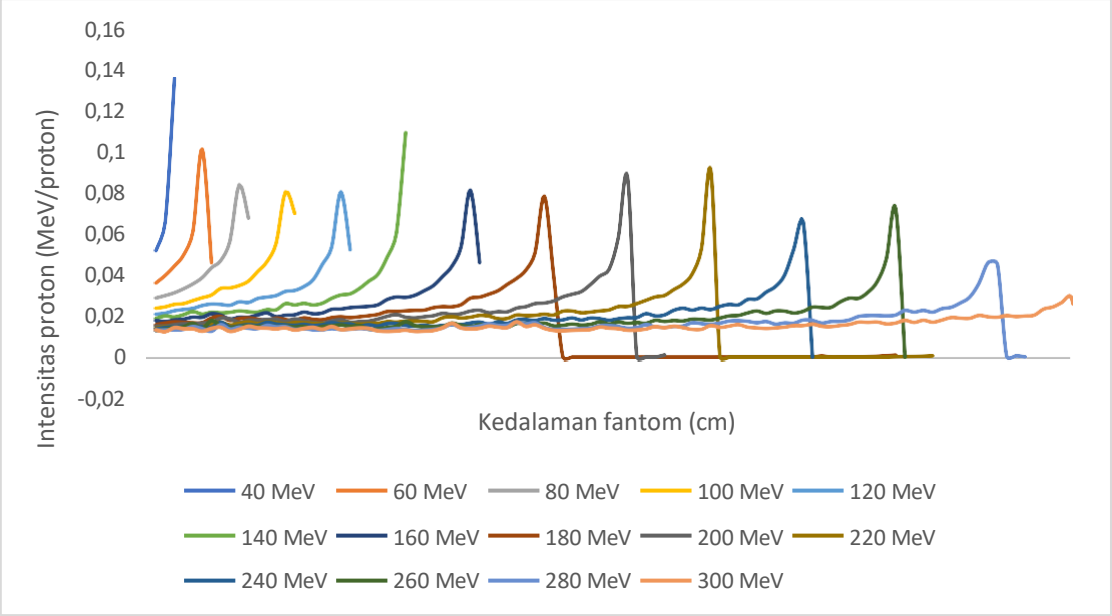
Pada penelitian ini, simulasi Monte Carlo dengan menggunakan PHITS 3.28 telah dilakukan untuk menentukan posisi puncak Bragg dari proton yang ditembakkan pada fantom air berbentuk silinder. Hasil simulasi menunjukkan bahwa posisi puncak Bragg bergantung pada energi proton,

dengan kedalaman puncak Bragg meningkat seiring bertambahnya energi proton. Tabel 1 menunjukkan data penelitian dibandingkan dengan basis data NIST berdasarkan ICRU Report No 49.

Tabel 1 Hasil posisi puncak Bragg yang diperoleh dari simulasi dibandingkan dengan data NIST

Energi Proton (MeV)	Simulasi PHITS (cm)	NIST (cm)
40	1,5	1,48
60	3	3,08
80	5	5,17
100	7,5	7,70
120	10,5	10,65
140	14	13,96
160	17,5	17,63
180	21,5	21,63
200	26	25,93
220	30	30,52
240	35,5	35,37
260	40,5	40,58
280	46	45,83
300	50	50,39

Hasil simulasi menunjukkan adanya hubungan linier antara energi proton dan kedalaman puncak Bragg dalam rentang energi yang diteliti. Seiring dengan bertambahnya energi proton, kedalaman puncak Bragg meningkat dari 1,5 cm pada 40 cm hingga mencapai 50 cm pada 300 MeV. Hal ini sesuai dengan teori fisika radiasi, dimana proton dengan energi yang lebih tinggi akan menempuh jarak yang lebih jauh dalam medium sebelum kehilangan energinya secara signifikan (Newhauser & Zhang, 2015), yang menyebabkan puncak Bragg terjadi pada kedalaman yang lebih dalam, seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi dosis kedalaman (Puncak Bragg) untuk berbagai energi proton.

Pada energi rendah seperti 40 MeV, proton kehilangan energi dengan cepat sehingga puncak Bragg berada di kedalaman yang dangkal, yakni 1,5 cm. Hal ini menunjukkan bahwa proton energi rendah cocok untuk pengobatan tumor yang terletak dekat dengan permukaan tubuh. Di sisi lain, pada energi tinggi seperti 300 MeV, puncak Bragg berada pada kedalaman yang lebih dalam (50 cm), yang lebih sesuai untuk pengobatan tumor yang terletak jauh di dalam tubuh, seperti pada organ dalam atau tumor besar (Reaz et al., 2022).

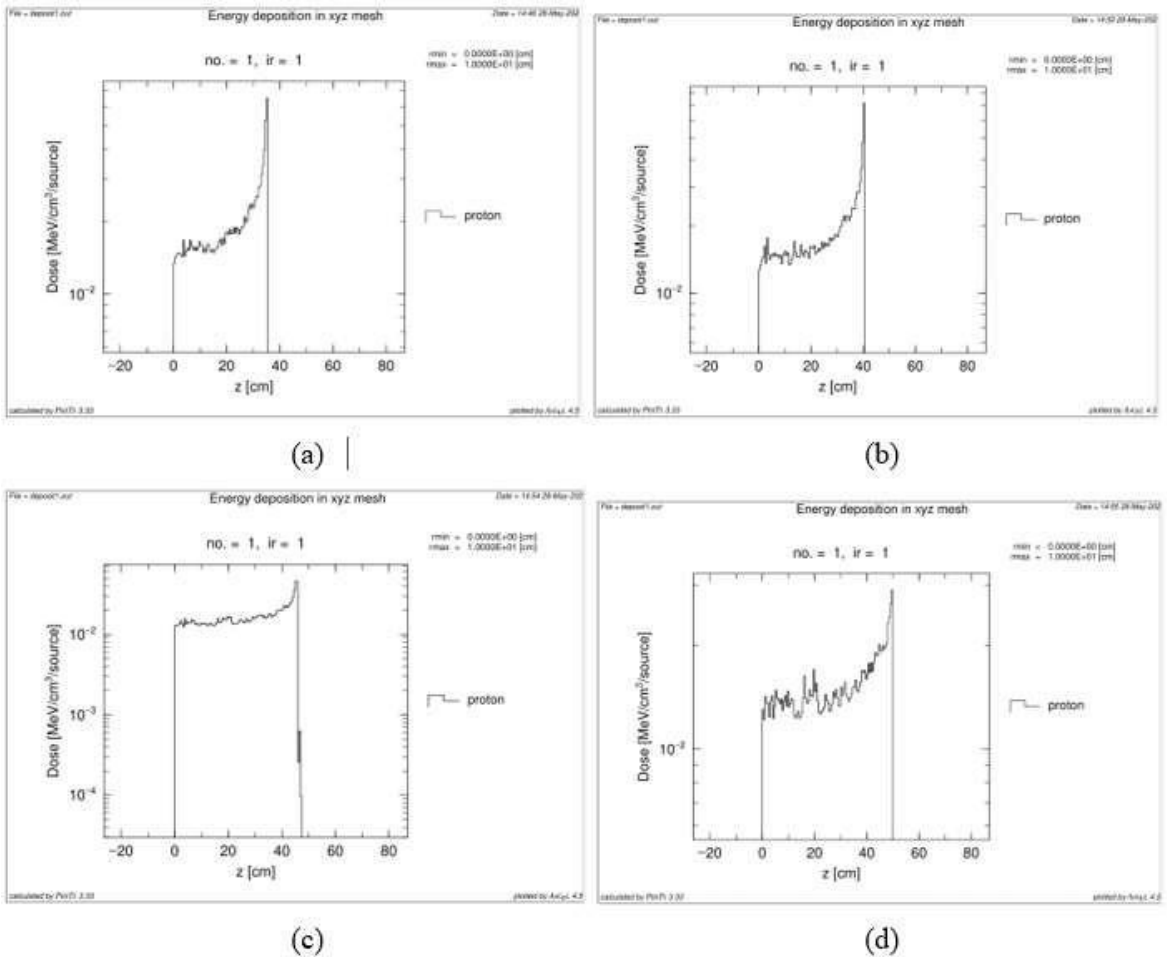
Kedalaman puncak Bragg yang diperoleh dalam simulasi ini sesuai dengan data referensi dari literatur yang diakui, yaitu dari NIST. Ini menunjukkan bahwa simulasi yang dilakukan dengan PHITS 3.28 telah berhasil memodelkan interaksi proton dengan air secara akurat. Akurasi ini penting untuk memastikan bahwa perhitungan dosis dalam terapi proton dapat diterapkan secara klinis (Chang & Liu, 2022.).

Imformasi mengenai kedalaman puncak Bragg ini sangat penting dalam perencanaan terapi proton. Dalam praktik klinis, energi proton yang tepat harus dipilih agar puncak Bragg terjadi pada lokasi tumor, memastikan bahwa dosis maksimum diterapkan pada tumor dengan meminimalkan

kerusakan pada jaringan sehat di sekitar. Dengan mengetahui puncak Bragg untuk berbagai energi proton, dokter dapat merancang pengobatan yang lebih presisi dan efektif.

Kemunculan Puncak Compton

Pada simulasi Monte Carlo yang dilakukan menggunakan PHITS 3.28, pencak Compton terdeteksi pada kedalaman 20 cm dari permukaan fantom air untuk energi proton dimulai dari 260, 280 dan 300 MeV. Dimana intensitas puncak sompton tersebut cenderung lebih tinggi untuk energi yang lebih tinggi, seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Distribusi dosis kedalaman proton pada material air pada energi (a) 240 MeV, (b) 260 MeV, (c) 280 MeV, dan (d) 300 MeV)

Puncak Compton yang diamati pada kedalaman 20 cm untuk energi proton 260 hingga 300 MeV menunjukkan bahwa pada energi ini, terjadi interaksi yang signifikan antara proton dan electron

dalam air melalui proses hamburan Compton. Hamburan Compton adalah interaksi antara proton yang energinya cukup tinggi dengan electron dalam medium yang menyebabkan pelepasan energi dan radiasi sekunder berupa sinar gamma.

Puncak compton yang teramati pada kedalam 20 cm memiliki beberapa implikasi penting dalam konteks terapi proton, yaitu dosis sekunder, dimana radiasi gamma yang dihasilkan dari hamburan compton dapat memberikan dosis tambahan yang tidak diinginkan pada jaringan sehat di sekitar tumor. Ini merupakan factor penting yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan terapi proton, terutama pada energi proton yang tinggi. Selain itu puncak compton juga berpengaruh keamanan pasien. Peningkatan intensitas puncak compton pada energi yang lebih tinggi menunjukkan bahwa terapi proton dengan energi yang sangat tinggi dapat meningkatkan risiko dosis sekunder pada jaringan sehat, sehingga perlu pengaturan yang tepat dalam perencanaan dosis. Puncak compton yang signifikan pada kedalaman 20 cm juga menunjukkan, meskipun puncak Bragg belum tercapai, sudah ada kontribusi dosis yang berasal dari radiasi sekunder akibat hamburan compton (Galler et al., 2001).

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa hasil simulasi menunjukkan bahwa posisi Bragg meningkat seiring dengan bertambahnya energi proton. Kedalaman puncak Bragg bervariasi dari 1,5 cm pada energi 40 MeV hingga 50 cm pada energi 300 MeV. Informasi mengenai posisi puncak Bragg sangat penting dalam perencanaan terapi proton, karena memungkinkan dosis maksimum untuk ditargetkan pada tumor, sehingga meminimalkan dampak pada jaringan sehat di sekitarnya. Selain itu, puncak compton terdeteksi pada kedalaman 20 cm untuk proton dengan energi 260 hingga 300 MeV. Intensitas puncak compton meningkat seiring dengan bertambahnya energi proton, yang menunjukkan bahwa interaksi hamburan compton lebih signifikan pada energi yang lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Lambung Mangkurat (LPPM ULM) atas dukungan dana hibah Program Dosen Wajib Meneliti (PDWM) yang telah memungkinkan terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Boer, C. G., Fjellanger, K., Sandvik, I. M., Ugland, M., Engeseth, G. M., & Hysing, L. B. (2022). Substantial Sparing of Organs at Risk with Modern Proton Therapy in Lung Cancer, but

Altered Breathing Patterns Can Jeopardize Target Coverage. Cancers, 14(6). https://doi.org/10.3390/cancers14061365

Chang, J. Y., & Liu, H. (n.d.). Chinese Anti 鄄 Cancer A ssociation CACA. www.cjcsysu.com

Dwi Fianto, Moh. M., Sardjono, Y., Harto, A. W., Triatmoko, I. M., Wijaya, G. S., & Kasesaz, Y. (2022). DOSE DISTRIBUTION ANALYSIS OF PROTON THERAPY FOR MEDULLOBLASTOMA CANCER WITH PHITS 3.24. JURNAL TEKNOLOGI REAKTOR NUKLIR TRI DASA MEGA, 24(1), 27. https://doi.org/10.17146/tdm.2022.24.1.6581

Galler, G., Lisin, V., Kondratiev, R., Massone, A. M., Wolf, S., Ahrens, J., Arends, H.-J., Beck, R., Camen, M., Capitani, G. P., Grabmayr, P., Hall, S. J., Härter, F., Hehl, T., Jennewein, P., Kossert, K., L'vov, A. I., Molinari, C., Ottonello, P., … Wissmann, F. (2001). Compton scattering by the proton ☆. In Physics Letters B (Vol. 503). www.elsevier.nl/locate/npe

Gargett, M. A., Briggs, A. R., & Booth, J. T. (2020). Water equivalence of a solid phantom material for radiation dosimetry applications. Physics and Imaging in Radiation Oncology, 14, 43–47. https://doi.org/10.1016/j.phro.2020.05.003

Lane, S. A., Slater, J. M., & Yang, G. Y. (2023). Image-Guided Proton Therapy: A Comprehensive Review. In Cancers (Vol. 15, Issue 9). MDPI. https://doi.org/10.3390/cancers15092555

Newhauser, W. D., & Zhang, R. (2015). The physics of proton therapy. In Physics in Medicine and Biology (Vol. 60, Issue 8, pp. R155–R209). Institute of Physics Publishing. https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/8/R155

Press, R. H., & Mehta, M. P. (2024). Proton Therapy: Current Status and Controversies. JCO Oncology Practice, 20(6), 747–749. https://doi.org/10.1200/op.24.00132

Reaz, F., Sjobak, K. N., Malinen, E., Edin, N. F. J., & Adli, E. (2022). Sharp dose profiles for high precision proton therapy using strongly focused proton beams. Scientific Reports, 12(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-22677-0

Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. ichiro, Kai, T., Tsai, P. E., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L., & Niita, K. (2018). Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. Journal of Nuclear Science and Technology,55(6), 684–690. https://doi.org/10.1080/00223131.2017.141989