

Identifikasi Partikel Neutron Akibat Tembakan Proton pada Molekul Air

Gusti Atika Urfa^{*}, Amar Vijai Nasrulloh, Nurma Sari.

Universitas Lambung Mangkurat

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

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v20i1.14684>

Submitted: 04 November 2022; Accepted: 22 Februari 2023

ABSTRAK– Terapi proton adalah suatu modalitas terapi kanker yang dapat memberikan dosis tepat pada area tumor kanker dibandingkan dengan terapi foton. Namun efek biologis terapi proton masih belum banyak diketahui. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi penembakan proton dengan energi 110 MeV pada material air dengan menggunakan software Geant4. Pemilihan material air sebagai objek penembakan proton sesuai dengan komposisi tubuh manusia yang didominasi oleh air. Molekul air pada penelitian ini berbentuk kubus dengan ukuran 10x10x10 cm dan dikelilingi oleh material PMMA dengan ketebalan 0,5 cm. Dari hasil simulasi dapat terlihat bahwa < 2% neutron terbentuk karena interaksi partikel proton dengan material air. Dosis kecil dari neutron dapat berbahaya bagi tubuh karena neutron memiliki keefektifan biologis yang besar sehingga dosis kecil dapat menimbulkan efek samping bagi pasien.

Kata kunci : neutron, proton, terapi, simulasi Geant4

ABSTRACT– Proton therapy is a treatment modality that can deliver doses precisely to cancer tumours compared to photon therapy. However, studies about the biological effect of proton therapy are not well known. This study, simulation of proton bombardment with energy 110 MeV to water, is conducted using Geant4 software. The selection of water as the object of proton bombardment is due to the majority of the human body that is consisted of water. The water molecule in this simulation is cube-shaped at 10x10x10 cm and surrounded by PMMA material with 0.5 cm thickness. The simulation results show that <2% of neutron particles are formed due to the interaction of proton particles with water material. A small dose of the neutron can be dangerous for the body because it has high biological effectiveness, and thus even a small absorbed dose might cause harmful side effects in the patient.

Keywords: neutron, proton, therapy, Geant4 simulation

PENDAHULUAN

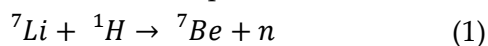
Terapi proton merupakan suatu terobosan modern yang digunakan sebagai salah satu teknik pengobatan kanker yang efektif selain menggunakan radiasi sinar X dan gamma. Keunggulan terapi proton dibandingkan dengan terapi konvensional menggunakan foton, yaitu sinar-X dan gamma, terletak pada distribusi dosisnya. Distribusi dosis pada terapi proton adalah memberikan dosis yang kecil pada saat penetrasi, dan pada titik tertentu dosis radiasi meningkat dengan tajam bergantung pada energi partikel proton yang ditembakkan. Semakin besar energi partikel proton maka semakin dalam penetrasi sinar

proton di dalam tubuh manusia. Perbedaan antara profil dosis proton dan foton digambarkan pada Gambar 1. Pada aplikasi klinis, *Spread-Out Bragg Peak* (SOBP), yaitu penggunaan energi proton yang bervariasi digunakan untuk meliputi volume tumor yang akan dilakukan terapi (Newhauser and Zhang 2015, Lee 2020).

Selain memberikan manfaat bagi tubuh dalam pengobatan kanker, terapi dengan menggunakan radiasi juga memiliki potensi bahaya, tidak terkecuali terapi proton. Sampai saat ini penelitian mengenai efek radiasi dengan menggunakan terapi proton bagi tubuh masih terus dilakukan. Terapi proton

menggunakan partikel proton berenergi yang dipercepat di dalam akselerator. Interaksi partikel proton berenergi tinggi dengan material memiliki probabilitas yang tinggi untuk mengionisasi materi dan menghasilkan partikel radiasi sekunder seperti gamma, neutron, dan elektron. Partikel sekunder hasil ionisasi rentan menyebabkan kanker sekunder sehingga akan menimbulkan efek negatif bagi tubuh.

Neutron tidak dihasilkan dari peristiwa peluruhan radioaktif biasa, juga tidak dapat dipercepat di dalam suatu mesin karena merupakan partikel yang tidak bermuatan listrik. Tetapi neutron dapat dihasilkan dari reaksi inti dari partikel berenergi tinggi dalam suatu akselerator. Beberapa target material dapat menghasilkan reaksi neutron apabila ditembak oleh partikel berenergi tinggi (ICRU 2000, Biegun *et al.* 2012). Contohnya adalah penembakan litium oleh proton dan menghasilkan neutron seperti Persamaan (1):



Neutron merupakan partikel yang unik. Ketidadaan muatan listrik membuat neutron menjadi partikel yang penting. Ketika neutron menabrak materi, tidak berinteraksi dengan electron pada suatu atom, tetapi berinteraksi dengan inti. Interaksi neutron-inti menghasilkan transfer energi dari neutron ke inti atom. Penangkapan neutron pada inti atom sering menghasilkan isotop radioaktif.

Penelitian mengenai dampak neutron bagi jaringan tubuh sudah banyak dilakukan, salah satunya adalah penelitian (Vogel and Zaldivar 1972), neutron dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya tumor, baik itu jinak ataupun ganas di dalam jaringan tubuh.

Setiap jenis radiasi memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Untuk membandingkan tingkat efektivitas kerusakan biologi dari berbagai jenis radiasi digunakan RBE (*Relative Biological Effectiveness*), yaitu rasio dari total dosis serap radiasi yang dijadikan acuan, biasanya foton berenergi rendah seperti ${}^{60}\text{Co}$ atau foton 250 keV dengan dosis serap radiasi yang diamati, dalam hal ini neutron, yang memberikan efek biologis yang sama.

Tingginya nilai RBE neutron yang berdampak pada munculnya kanker sekunder menyebabkan sekecil apapun neutron yang terbentuk dari hasil terapi sangat penting (Schneider and Hälgl 2015).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui persentase terciptanya partikel neutron yang muncul karena adanya interaksi proton dengan air. Materi yang digunakan dalam pengamatan adalah air karena tubuh manusia terdiri dari 70% air. Selanjutnya hasil penelitian digunakan sebagai hasil awal untuk penelitian dampak biologis radiasi proton dalam tubuh, yang diharapkan melahirkan rekomendasi mengenai pentingnya proteksi radiasi dan prinsip *ALARA - As Low As Reasonably Achievable* dalam penggunaan radiasi proton untuk terapi kanker.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan simulasi monte carlo menggunakan *software* Geant4 versi 4.9.4.p02. *Software* tersebut merupakan peralatan untuk simulasi partikel menubruk materi. Aplikasi simulasi ini dapat berupa partikel fisika berenergi tinggi, nuklir dan akselerator fisika, fisika medis dan ilmu antariksa (Guatelli *et al.* 2011). Geant4 tersedia secara *open-source*, gratis dan memiliki kode *monte carlo* umum yang digunakan untuk riset fisika radiasi menggunakan partikel fisika berenergi tinggi (dalam rentang MeV) sampai rendah (dalam rentang eV) (Chauvie *et al.* 2007).

Geant4 menyediakan detektor radiasi yang komprehensif dan kemampuan memodelkan proses fisika yang terjadi di dalamnya. Pengguna dapat melacak partikel pada materi, termasuk adanya medan elektromagnetik, dan mendeskripsikan respon dari detektor.

Untuk mengetahui range atau kedalaman penetrasi proton dan partikel berat yang bermuatan di dalam material menggunakan persamaan *Bethe Bloch* pada Persamaan (2):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2 k_0^2 e^4}{m v^2} \left[\ln \frac{2 m v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (2)$$

Dimana:

e = muatan listrik

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

v = kecepatan partikel

m = massa istirahat elektron

z = muatan elektron

I = *mean excitation potential* dari material *absorber*

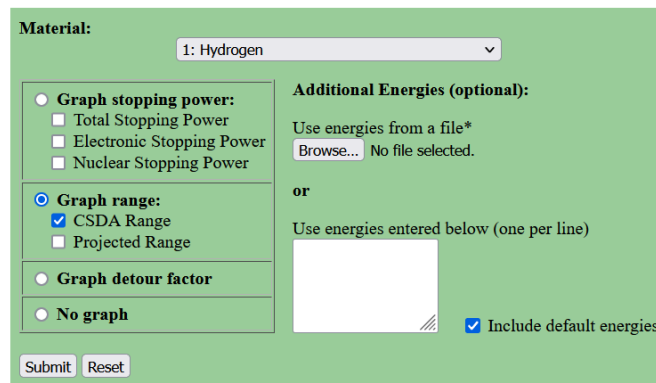
n = jumlah elektron per unit volume pada *absorber*

$\beta = \frac{v}{c}$ (v merupakan kecepatan partikel, c merupakan kecepatan cahaya pada vakum)

Program PSTAR yang dikembangkan oleh NIST (*National Institute of Standar and Technology*) digunakan untuk menghitung *stopping power* dan jangkauan proton pada material yang bervariasi. Tampilan program

PSTAR ditunjukkan pada Gambar 1. Informasi yang didapat dari program PSTAR ini adalah *stopping power* dari sistem elektronik, dari inti material peluruhan, total *stopping power* dan jangkauan proton di dalam material. *Stopping power* dapat dikelompokkan menjadi 3 jenis yaitu total, elektronik dan inti.

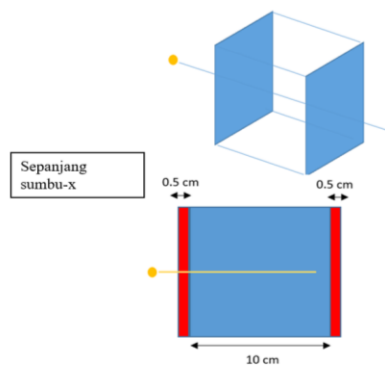
Dalam penelitian ini ditembakkan partikel proton dengan energi 110 MeV; $\sigma = 8$ keV kepada material air dengan dimensi 10 cm x 10 cm x 10 cm. Rentang energi yang umum digunakan dalam terapi proton adalah 70 – 250 MeV (Mohan 2022). Proton dengan energi 110 MeV berhenti pada jangkauan 9,12 cm di dalam air, yang mana masih dalam jangkauan fantom yang dibuat dalam simulasi ini (PSTAR n.d.). Di sekeliling material air, diletakkan



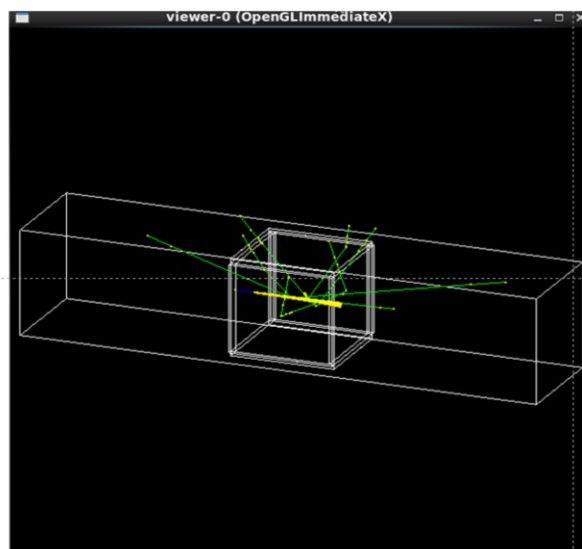
Gambar 1. Tampilan program PSTAR yang diambil dari website NIST (<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>)

Simulasi:

- Energi Proton = 110 MeV, $\sigma = 0,008$ MeV
- Jumlah Proton = 10.000 partikel
- Geometri = 10 cm x 10 cm x 10 cm dikelilingi oleh 0,5 cm PMMA



(a)



(b)

Gambar 2 (a) Partikel proton (kuning) ditembakkan pada air (biru) yang ada di dalam wadah PMMA (merah) (b) Tampilan visual OGLIX Geant4.9 versi 4 (proton (biru), elektron (kuning), gamma (hijau)).

material PMMA dengan ketebalan 0,5 cm yang digunakan sebagai pendeteksi partikel sekunder yang terbentuk dari interaksi radiasi proton dengan air. Ilustrasi penembakan radiasi proton pada air adalah seperti pada Gambar 3.a

Pada tampilan *visual OGLIX* Gambar 3.b, partikel proton digambarkan dengan warna biru, partikel elektron berwarna kuning, dan partikel gamma digambarkan dengan warna hijau.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini ditembakkan partikel proton dengan energi 110 MeV dengan deviasi ($\sigma=0,008$) sebanyak 10.000 partikel. Pemilihan energi dalam simulasi ini berdasarkan data energi proton yang digunakan untuk terapi yaitu 70–250 MeV (Mohan and Grosshans 2017). Total *stopping power* partikel proton dengan energi 110 MeV di dalam air berdasarkan program PSTAR adalah 9,12 cm sesuai dengan grafik pada Gambar 4. Dengan mengetahui *stopping power* dan energi, dapat diperkirakan dimensi material yang akan ditembaki oleh proton yaitu 10x10x10 cm. Interaksi proton dengan material dapat menyebabkan adanya interaksi sekunder yang menghasilkan partikel sekunder, salah satunya adalah neutron. Studi mengenai paparan radiasi neutron masih sangat terbatas pada manusia. Seperti sinar X dan gamma, neutron termasuk dalam radiasi pengion. Neutron telah diuji dengan berbagai dosis dan laju dosis dengan berbagai sumber, misalnya reaktor nuklir, ^{252}Cf , ^{235}U untuk

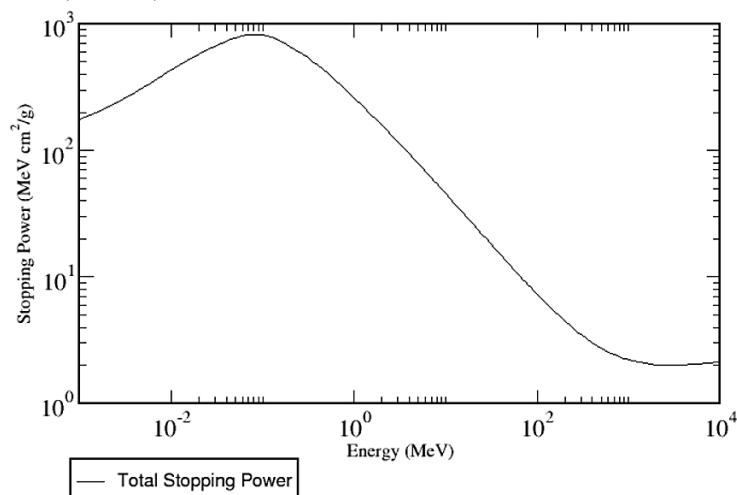
melihat kemungkinan karsinogenitas pada tikus, kelinci, anjing dan monyet (Wolf *et al.* 2000, Chun *et al.* 2015).

Dalam penelitian ini didapatkan adanya neutron yang terbentuk akibat adanya interaksi antara proton berenergi tinggi (110 MeV) dengan air. Di sekeliling material air, diletakkan material PMMA yang berfungsi sebagai detektor radiasi yang menangkap partikel sekunder hasil dari proses ionisasi partikel proton dengan air.

Berdasarkan sumbu horizontal, sesuai dengan arah penyinaran proton, energi kinetik proton yang melewati PMMA di depan air adalah 110 MeV, sedangkan energi deposit adalah 3,4 MeV. Sehingga dapat dibuktikan bahwa keluaran radiasi proton yang ditembakkan pada material air sesuai dengan energi kinetik yang diatur pada simulasi Geant4.

Partikel neutron yang terdeteksi pada PMMA di sekeliling air tertulis pada Tabel 1. Persentase neutron merupakan rasio jumlah partikel neutron yang terdeteksi dengan jumlah partikel proton yang ditembakkan (Chaudhri 1992).

Distribusi energi partikel neutron yang terdeteksi di sekeliling air digambarkan pada Gambar 5, dimana sumbu-x merupakan energi kinetik partikel neutron yang terdeteksi dalam material PMMA, sedangkan sumbu-y merupakan jumlah partikel neutron yang terdeteksi



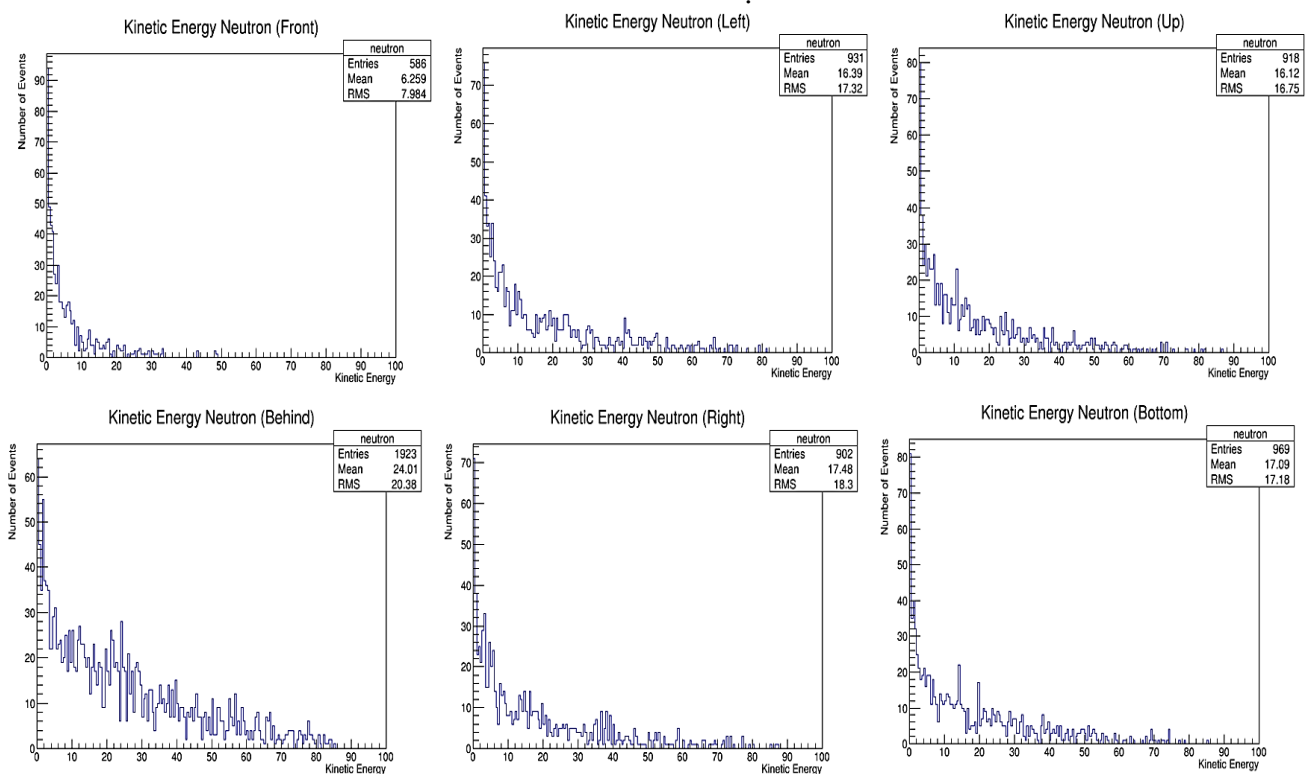
Gambar 3. *Stopping power* dan jangkauan proton dengan berbagai energi

Tabel 1. Jumlah partikel neutron yang terdeteksi di sekeliling material air

Posisi	Jumlah Partikel	Persentase
Depan	586	0,5%
Belakang	1923	1,9%
Kiri	931	0,9%
Kanan	902	0,9%
Atas	918	0,9%
Bawah	969	0,9%

Dari data yang terdeteksi di PMMA, diperoleh distribusi energi dari rentang 0–100 MeV. Neutron yang terdeteksi di PMMA di depan material air, yaitu sebanyak 0,5%, cenderung lebih sedikit daripada PMMA yang

terdeteksi di sekeliling air, sebanyak 0,9%. Hal ini membuktikan bahwa neutron yang terhambur balik setelah tumbukan proton dengan air lebih sedikit daripada neutron yang terhambur ke bagian samping dari material air. Sedangkan neutron yang terdeteksi di bagian belakang memiliki persentase paling banyak, yaitu 1,9%. Hal ini disebabkan oleh posisi *Bragg peak* berada di posisi 9,12 cm yaitu relatif di bagian belakang material air. Sehingga interaksi atau cross section yang terjadi lebih dominan di bagian belakang dan neutron yang terdeteksi paling banyak di PMMA belakang air.

**Gambar 4. Distribusi energi kinetik neutron yang dideteksi oleh PMMA**

Terbentuknya neutron akibat dari interaksi proton dengan air dapat menyebabkan adanya kontribusi dosis radiasi yang tidak diinginkan dalam air. Jika kasus ini diimplementasikan ke dalam tubuh, maka terapi proton dapat berbahaya karena berpotensi terbentuknya kanker sekunder. Penelitian yang dilakukan Halnan, *et al* dan Jones *et al* menunjukkan bahwa nilai RBE atau *Relative Biological Effectiveness* neutron relatif tinggi dibandingkan dengan partikel radiasi

yang lain (proton, gamma, elektron) (Halnan and Hornsey 1981, Jones *et al.* 2011). RBE neutron bergantung pada energi dan geometri materi yang dilaluinya. Studi mengenai nilai RBE neutron masih perlu dipelajari lebih lanjut.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dengan menggunakan software Geant4.9 diketahui bahwa banyaknya partikel neutron yang terdeteksi di sekeliling material air berbentuk kubus yang ditembak

oleh proton adalah $< 2\%$ dari total partikel proton yang ditembakkan. Namun, rendahnya persentase partikel neutron yang terbentuk bukan berarti potensi terbentuknya sel kanker sekunder mengecil. Selanjutnya, dibutuhkan studi lebih lanjut untuk mendapatkan informasi mengenai nilai RBE neutron yang mungkin menyebabkan pembentukan kanker sebagai fungsi dosis neutron, energi, laju dosis, tipe jaringan, dan geometri serta dimensi masing-masing pasien yaitu ukuran pasien.

DAFTAR PUSTAKA

- Biegun, A.K., Seravalli, E., Lopes, P.C., Rinaldi, I., Pinto, M., Oxley, D.C., Dendooven, P., Verhaegen, F., Parodi, K., Crespo, P., and Schaart, D.R., 2012. Time-of-flight neutron rejection to improve prompt gamma imaging for proton range verification: A simulation study. *Physics in Medicine and Biology*, 57 (20), 6429–6444.
- Chaudhri, M.A., 1992. Neutron productions from carbon by charged particle bombardment at different energies. *Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, BC, Canada NEUTRON*, 1, 178–180.
- Chauvie, S., Francis, Z., Guatelli, S., Incerti, S., Mascialino, B., Moretto, P., Nieminen, P., and Pia, M.G., 2007. Geant4 physics processes for microdosimetrysimulation: design foundation and implementation of the first set of models, 54 (6), 2619–2628.
- Chun, M., Choi, Y.H., and Kim, J.H., 2015. Automated measurement of CT noise in patient images with a novel structure coherence feature. *Physics in Medicine and Biology*, 60 (23), 9107–9122.
- Guatelli, S., Cutajar, D., Oborn, B., and Rosenfeld, A.B., 2011. Introduction to the geant4 simulation toolkit. *AIP Conference Proceedings*, 1345 (May), 303–322.
- Halnan, K.E. and Hornsey, S., 1981. RBE values for neutron therapy: A simple method for converting acceptable photon dose to limiting neutron dose. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 7 (5), 601–604.
- ICRU, 2000. Nuclear Data for Neutron and Proton Radiotherapy and for Radiation Protection [online]. *Nuclear Science*. Available from: <https://icru.org/home/reports/nuclear-data-for-neutron-and-proton-radiotherapy-and-for-radiation-protection-report-63>.
- Jones, B., Underwood, T.S.A., Carabe-Fernandez, A., Timlin, C., and Dale, R.G., 2011. Fast neutron relative biological effects and implications for charged particle therapy. *British Journal of Radiology*, 84 (SPEC. ISSUE 1), 11–18.
- Lee, S.B., 2020. Proton Therapy Review : Proton Therapy from a Medical, 31 (September), 99–110.
- Mohan, R., 2022. A review of proton therapy – Current status and future directions. *Precision Radiation Oncology*, 6 (2), 164–176.
- Mohan, R. and Grosshans, D., 2017. Proton therapy – Present and future. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 109, 26–44.
- Newhauser, W.D. and Zhang, R., 2015. The physics of proton therapy. *Physics in Medicine and Biology*, 60 (8), R155–R209.
- PSTAR, n.d.
- Schneider, U. and Hälgl, R., 2015. The Impact of Neutrons in Clinical Proton Therapy. *Frontiers in Oncology*, 5 (October), 1–5.
- Vogel, H.H. and Zaldivar, R., 1972. Neutron-Induced Mammary Neoplasms in the Rat1. *Cancer Research*, 32 (5), 933–938.
- Wolf, C., Lafuma, J., Masse, R., Morin, M., and Kellerer, A.M., 2000. Neutron RBE for induction of tumors with high lethality in Sprague-Dawley rats. *Radiation Research*, 154 (4), 412–420.