

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Radioterapi

Radioterapi adalah jenis terapi yang menggunakan radiasi dosis tinggi sebagai penghancur sel-sel kanker. Radiasi yang dipancarkan akan merusak sel kanker dengan tujuan menghambat proses multiplikasi atau pembelahan sel-sel kanker (Susworo, 2007). Tujuan radioterapi adalah agar sel-sel tumor dapat dimatikan semaksimal mungkin dan efek samping yang terjadi pada jaringan normal dibuat seminimal mungkin (Santoso et al., 2009).

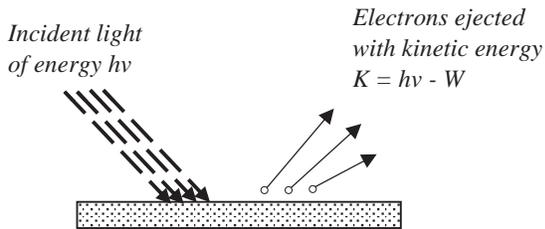
Radioterapi memiliki dua teknik yang perbedaannya terletak pada penempatan sumber radiasi, yaitu teknik teleterapi dan teknik brakiterapi. Teknik teleterapi (eksternal), sumber radiasinya memiliki jarak tertentu dengan target radiasi, sedangkan teknik brakiterapi (internal) menggunakan sumber radiasi yang diletakan langsung pada target radiasi atau meletakan radiasi sedekat mungkin dengan target radiasi (Alatas et al., 2015).

2.2 Interaksi Foton dengan Materi

Interaksi foton dengan materi secara umum terdiri dari tiga proses utama, yakni efek fotolistrik, efek compton, dan produksi pasangan.

2.2.1 Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik adalah fenomena saat elektron terlontar akibat energi dari foton yang mengenai suatu bahan. Efek fotolistrik dapat dilihat pada Gambar 2.1.

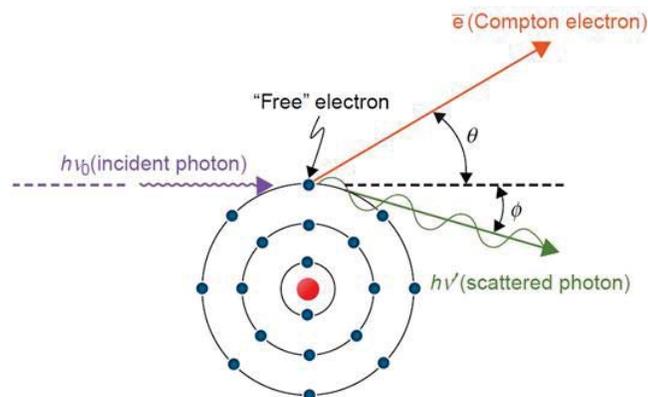


Gambar 2.1 Skematik efek fotolistrik

Gambar 2.1 menunjukkan foton datang dengan energi $h\nu$ (h adalah konstanta Planck dan ν adalah frekuensi) yang berinteraksi dengan material. Energi yang dibawa oleh foton diberikan ke elektron untuk melepaskan elektron dari logam berenergi W (disebut fungsi kerja dan nilainya bergantung pada bahan), kemudian sisa energi foton tersebut diberikan kepada elektron sebagai energi kinetik K . Elektron yang terlepas dinamakan dengan fotoelektron.

2.2.2 Efek Compton

Efek Compton adalah interaksi antara foton dan elektron yang terikat lemah. Hal ini, mengakibatkan elektron terpental dari orbit dengan energi kinetik tertentu dan foton terhambur dengan sudut ϕ (Khan & Gibbons, 2014).

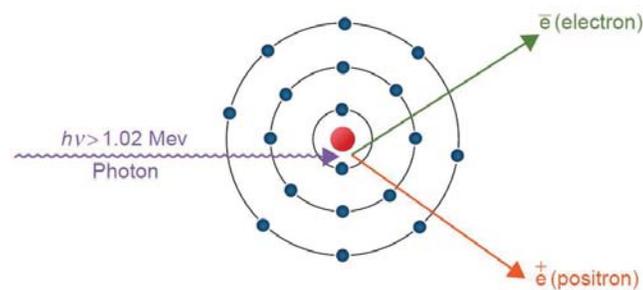


Gambar 2.2 Skematik efek compton (Khan & Gibbons, 2014)

Gambar 2.2 menunjukkan foton yang datang memiliki energi sebesar $h\nu_0$ (h adalah konstanta Planck dan ν_0 adalah frekuensi awal) pada saat awal penyinaran. Kemudian foton datang berinteraksi dengan elektron, elektron menyerap sebagian energi foton mengakibatkan elektron tersebut terpental dari orbit dengan sudut θ dan foton terhambur dengan energi sebesar $h\nu'$ yang membentuk sudut sebesar ϕ . Interaksi tersebut didapat dari konservasi kekekalan energi dan kekekalan momentum, hasilnya berupa perbedaan panjang gelombang terhambur dengan panjang gelombang yang datang.

2.2.3 Produksi Pasangan

Produksi pasangan adalah fenomena terjadinya interaksi kuat antara foton dengan medan elektromagnetik inti atom dan semua energinya dilepas dalam proses pembentukan pasangan (Gambar 2.3). Pembentukan pasangan terdiri dari elektron (e^-) dan positron (e^+). Diperlukan energi minimum sebesar 1,02 MeV untuk terbentuknya pasangan elektron dan positron. Energi kinetik total sebesar $(h\nu - 1,02)$ MeV untuk pasangan elektron-positron (Khan & Gibbons, 2014).



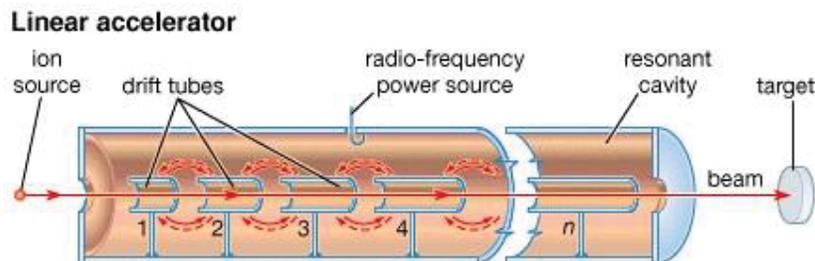
Gambar 2.3 Skematik efek produksi pasangan (Khan & Gibbons, 2014)

2.3 *Linear Accelerator (LINAC)*

Tahun 1953, *Linear Accelerator (Linac)* digunakan pertama kali di Hammer Smith Hospital, London. *Linear Accelerator (Linac)* adalah perangkat yang menggunakan gelombang elektromagnetik pada frekuensi tinggi agar partikel bermuatan seperti elektron berenergi tinggi dapat dipercepat melalui tabung linear. Elektron yang berenergi tinggi dapat langsung digunakan untuk pengobatan tumor dangkal dan sinar-X dapat digunakan dalam pengobatan tumor yang berada jauh dari permukaan. Sinar-X dihasilkan dari modifikasi benturan elektron dengan material lainnya (target) (Jusmawang et al., 2015). Besar energi elektron yang akan dipercepat adalah 3 MeV hingga 18 MeV. Partikel tersebut dipercepat dengan menggunakan medan listrik hasil dari gelombang elektromagnetik di dalam tabung gelombang pemercepat (*accelerating waveguide*) (Barozi & Kartawiguna, 2015). Tabung penghantar ini tersusun dari sel-sel yang berupa rongga-rongga resonansi yang hampa terbuat dari tembaga (Bentel, 1996)

Magnetron atau *klystron* menyalurkan gelombang mikro yang dibangkitkan ke dalam tabung. *Magnetron* atau *klystron* merupakan komponen isolator berfrekuensi sesuai dengan frekuensi resonansi tabung (3000 MHz). *Magnetron* atau *klystron* menghasilkan gelombang mikro dengan panjang gelombang 10 cm. Gelombang mikro dapat disalurkan dengan melewati sirkulator dan tabung pemandu gelombang pemercepat elektron. Pemandu gelombang tersebut memiliki dua jenis yakni *traveling* dan *standing waveguide*. Daya frekuensi gelombang mikro yang melewati rongga-rongga sel pemercepat menghasilkan medan elektromagnetik di dalam tabung pemercepat dan medan listrik yang dinamis, serta mengakibatkan perubahan pada muatan setiap sel karena periode sel yang berubah-ubah sesuai dengan

perubahan amplitudo gelombang mikro. Pemanfaatan dari perubahan periode muatan listrik tersebut sebagai pemercepat pergerakan elektron (Khan, 2003).



Gambar 2.4 Rongga-rongga dari tabung penghantar Linac (Khan, 2003)

Elektron dihasilkan dengan peristiwa efek fotolistrik oleh elektron *gun*. Sebuah elektron *gun* dilengkapi dengan filamen tungsten yang dipanaskan. Akibatnya muncul arus elektron yang terlepas dari tungsten tersebut. Berawal dari memanaskan katoda, sehingga dihasilkan berkas elektron yang ditembakkan dengan energi awal sebesar 15 keV secara sinkron. Tabung pemercepat memiliki pengendali arus atau *drift tube* yang berfungsi membalik polarisasi dari medan listrik. Proses ini mengakibatkan terjadinya lompatan partikel sehingga kecepatan pada partikel atau energi kinetik partikel yang dihasilkan dapat bertambah. Ketika energi kinetik yang dibutuhkan telah tercapai, maka berkas elektron dengan kecepatan tinggi akan diarahkan untuk menumbuk lempengan logam. Dikarenakan energi yang ditumbukkan ke lempeng logam sangat tinggi, maka pada proses ini menghasilkan berkas foton. Berkas foton yang dihasilkan tersebut diarahkan keluar melalui kepala Linac yang disebut *gantry* yang selanjutnya di arahkan menuju target (Khan, 2003).

Pesawat Linac dapat dilakukan *treatment* secara langsung ketika sumber terapi yang digunakan adalah elektron. Namun ketika menggunakan terapi sinar-X, perlu adanya modifikasi interaksi antara elektron dengan bidang target tungsten. Tujuannya untuk menghasilkan sinar-X bremsstrahlung. Elektron dengan energi kinetik berinteraksi dengan medan energi pada inti atom target. Ketika jarak elektron dengan inti atom cukup dekat dan inti atom memiliki medan energi yang cukup besar untuk ditembus oleh elektron proyektil, maka elektron proyektil dapat kehilangan energinya dan terjadi perubahan arah (Khan, 2003).

2.4 Dosis Serap

Jumlah energi yang diserap oleh bahan atau jaringan hidup dapat mengakibatkan perubahan fisik maupun perubahan biologi, maka dari itu dosis serap perlu diprediksi secara akurat. Dosis serap adalah pembagian antara jumlah energi yang diberikan oleh radiasi pengion ke bahan dan massa bahan yang ada di volume yang sama (Handoko et al., 2018). Satuan Internasional (SI) untuk dosis serap adalah Joule/kg, satuan ini sering disebut Gray (Gy) ataupun dalam satuan non-SI adalah rad (Iswinning Diah & Anggraita, 2012). Rincian satuan dosis serap dapat dilihat sebagai berikut:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg} \quad (2.1)$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} \quad (2.2)$$

sehingga,

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} \quad (2.3)$$

Dosis serap dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.4)$$

dengan dE adalah energi yang terserap oleh bahan yang memiliki massa dm .

2.5 Percentage Depth Dose (PDD)

Percentage depth dose (PDD) adalah persentase perbandingan antara dosis serap di kedalaman tertentu dan dosis serap di kedalaman maksimum. Pengukuran PDD berperan penting dikarenakan kurva PDD dapat menentukan kualitas berkas radiasi. Dalam medis, aplikasi PDD dijadikan referensi dalam ditentukan besar energi radiasi yang akan digunakan untuk terapi (Podgorsak, 2005). PDD biasanya dinormalisasikan ke $D_{\text{maks}} = 100\%$ di kedalaman dosis maksimum D_{maks} (Khiftiyah et al., 2014). PDD dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.5):

$$PDD = \frac{D_d}{D_{d_0}} \times 100\% \quad (2.5)$$

dengan D_d adalah dosis pada sembarang titik (Gy), D_{d_0} adalah dosis maksimal (Gy).

2.6 *Source Surface Distance (SSD)*

Teknik SSD adalah teknik penyinaran pada radiasi eksternal yang jarak dari sumber radiasi ke permukaan kulit perlu diperhatikan. Tujuan dari teknik penyinaran agar distribusi dosis lebih merata daripada dosis jaringan disekitarnya (Liasari et al., 2022). Dalam penggunaan klinis biasanya menggunakan SSD standar yaitu 100 cm, tetapi SSD dapat diatur ulang kembali ketika dalam situasi tertentu (Perkasa & Sanjaya, 2016).

2.7 *MCNP (Monte Carlo N-Particle)*

MCNP adalah suatu *computer code* yang dapat menyimulasikan neutron, foton, elektron, transport neutron/foton/elektron yang berikatan, dan kalkulasi nilai eigen untuk sistem kritis. Metode transport yang dapat digunakan pada MCNP berupa hanya neutron, hanya foton, hanya elektron, kombinasi transport neutron/foton pada saat interaksi neutron memproduksi foton, neutron/foton/elektron, foton/elektron, atau elektron/foton (Briesmeister, 2000).

MCNP *Extended Version* (MCNPX) memiliki fitur tambahan dan kemampuan dalam simulasi proton dibandingkan dengan *series* sebelumnya. Satuan standar yang ada dalam MCNPX adalah: (a) panjang dalam sentimeter, (b) energi dalam MeV, (c) densitas atom dalam atoms/barn-cm, (d) densitas massa dalam g/cm³, (e) waktu dalam *shakes* (10⁻⁸ detik), (f) temperatur dalam MeV(kT), dan (g) tampang lintang dalam barns (10⁻²⁴ cm²). Energi foton radiasi yang dapat digunakan MCNP-X dalam mensimulasi memiliki batasan sebesar 1 keV-100 GeV (Sardjono, 2015).