

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Radioterapi adalah bagian penting dalam dunia kedokteran sebagai salah satu alternatif dalam penyembuhan tumor dan kanker menggunakan radiasi. Teleterapi Cobalt 60 merupakan salah satu aplikasi yang digunakan dalam pengobatan radioterapi menggunakan sumber radioaktif Cobalt 60. Pengobatan menggunakan teleterapi Cobalt 60 ini terbukti efektif mengobati tumor dan kanker selain dengan kemoterapi dan operasi.

Menurut Hoskin (2006), pada radioterapi dilakukan planning, simulasi baru kemudian penyinaran untuk meningkatkan rasio keberhasilan radioterapi. Penyinaran radioterapi dilakukan secara seri selama beberapa hari dalam seminggu. Penyinaran ini dinamakan dosis fraksinasi. Dosis fraksinasi ini dilakukan untuk memberikan kesempatan pada sel untuk regenerasi.

Radioterapi menggunakan radiasi Cobalt 60 tentunya menimbulkan efek bagi sel normal atau sehat yang berada di sekitar sel kanker yang diradiasi. Efek yang timbul ini tidak dapat dihindari karena radiasi yang diberikan bertujuan untuk membunuh sel kanker, tidak terkecuali sel sehat yang berada di sekitarnya. Namun, sel normal memiliki kemampuan regenerasi yang lebih baik daripada sel kanker. Efek ini dapat diminimalisir dengan memantau kondisi sel normal melalui beberapa pemeriksaan penunjang seperti pemeriksaan darah (patologi klinis). Selanjutnya dilakukan tindakan pencegahan untuk mencegah meningkatnya efek yang timbul sehingga keberhasilan radioterapi dapat dicapai secara maksimal.

Radioterapi dilakukan dengan memberikan radiasi pada organ tubuh secara terlokalisir di area tumor atau kanker. Pada kasus kanker yang berbeda radiasi yang diberikan akan menimbulkan efek yang berbeda karena organ tubuh yang terkena paparan radiasi berbeda pula. Organ tubuh yang terkena paparan radiasi yang tinggi juga memiliki faktor resiko yang

besar. Jika dalam jangka waktu yang lama hal ini tidak segera ditangani maka akan menimbulkan masalah baru bagi pasien. Dengan mengetahui faktor resiko ini maka efek radiasi dapat diminimalisir sehingga rasio kesembuhan pasien meningkat.

Penyinaran teleterapi Cobalt 60 pada kasus Ca Mammae dan Ca Cervix akan mengenai tulang belakang. Menurut Corwin (2009), di dalam tulang belakang terdapat sumsum tulang yang berfungsi untuk pembentukan sel darah. Sel darah ini meliputi sel darah merah (eritrosit), sel darah putih (leukosit) dan keping darah (trombosit). Pemberian radiasi pada dosis tertentu dapat menimbulkan efek pada sumsum tulang dan mempengaruhi produksi sel darah dalam tubuh. Dosis radiasi sekitar 0,5 Gy sudah dapat menyebabkan penurunan proses pembentukan sel darah sehingga sel darah akan menurun.

Dengan menganalisa hasil pemeriksaan darah pasien teleterapi Cobalt 60 pada kedua kasus ini, maka dapat diketahui pengaruh dan perbandingan resiko radiasi terhadap sumsum tulang dari kedua kasus tersebut. Menurut Pearce (2005), sel darah memiliki peran vital dalam mengatur fungsi tubuh. Semua jaringan memerlukan persediaan darah yang memadai untuk dapat menjalankan fungsinya. Jika mengalami gangguan maka besar kemungkinan terjadi gangguan pada bagian tubuh yang lain. Maka penting untuk mengetahui kondisi sumsum tulang belakang bagi pasien teleterapi Cobalt 60.

Berdasarkan uraian tersebut, penulis merasa tertarik untuk meneliti efek radiasi terhadap produksi sel darah pada pasien radioterapi menggunakan pesawat Cobalt 60 dengan kasus Ca Mammae dan Ca Cervix. Peneliti memilih kedua kasus tersebut karena pada kasus ini yang paling banyak dilakukan penyinaran radioterapi sebagai rangkaian pengobatan pasien dan merupakan dua kasus kanker terbanyak yang diderita wanita di Indonesia.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana efek radiasi terkait pemberian teleterapi Cobalt 60 pada kasus Ca Mammae dan Ca Cervix terhadap produksi sel darah?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini dibuat beberapa batasan masalah yaitu kasus yang akan diteliti adalah Ca Mammae dan Ca Cervix, hasil pemeriksaan laboratorium darah yang akan diteliti adalah eritrosit, leukosit, trombosit dan hemoglobin. Penulis tidak membahas secara detail diagnosa klinis dan riwayat penyakit.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui efek penyinaran radioterapi terhadap produksi sel darah pada pasien teleterapi Cobalt 60 dengan kasus Ca Mammae dan Ca Cervix.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran efek radiasi teleterapi Cobalt 60 pada kasus Ca Mammae dan Ca Cervix terhadap produksi sel darah yang dapat digunakan sebagai gambaran faktor resiko radiasi pada sumsum tulang dari masing-masing kasus. Dengan mengetahui faktor resiko dan dosis ambang ini dapat dilakukan tindakan pencegahan untuk meminimalisir resiko yang ditimbulkan dari pemeriksaan teleterapi Cobalt 60.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan bermanfaat untuk semua pihak yang ingin memajukan ilmu pengetahuan dan teknologi radioterapi.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radiasi

Radiasi adalah suatu cara perambatan energi dari sumber energi ke lingkungannya tanpa membutuhkan medium. Secara garis besar ada dua jenis radiasi yaitu, radiasi pengion dan radiasi non pengion. Radiasi pengion adalah radiasi yang dapat menyebabkan proses terlepasnya elektron dari atom sehingga terbentuk pasangan ion. Karena sifatnya yang dapat mengionisasi tubuh kita maka radiasi pengion perlu diwaspadai, terutama mengenai sumber-sumber, jenis-jenis, sifat dan bagaimana cara menghindarinya. Sedangkan radiasi non pengion relatif aman bagi tubuh (Anies, 2006).

Radiasi menyebabkan terionisasi atau tereksitasinya atom dan molekul sel di dalam jaringan tubuh. Apabila molekul pecah atau terdisosiasi karenanya, akan terbentuk fragment berupa radikal bebas dan ion, yang secara kimia tidak stabil. Radikal bebas sangat reaktif dan dengan mudah dapat bereaksi atau mengoksidasi atom lain dalam suatu sel yang dapat menyebabkan kerusakan sel (BATAN, 2007).

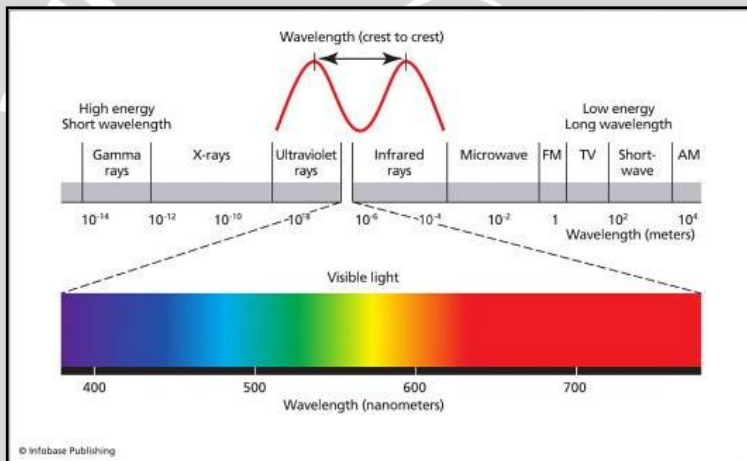
Tidak semua radiasi dapat menimbulkan ionisasi. Berdasarkan ada tidaknya ionisasi maka radiasi dibagi dalam dua kategori yaitu radiasi pengion dan radiasi non pengion. Radiasi non pengion adalah radiasi yang tidak menimbulkan ionisasi. Contohnya adalah cahaya tampak, sinar inframerah dan gelombang ultrasonik. Jenis sinar atau gelombang ini tidak dipakai di bagian radioterapi. Gelombang ultrasonik sering digunakan pada alat Ultrasonografi (USG) untuk tujuan diagnostik. Sedangkan radiasi pengion adalah radiasi yang dapat menimbulkan ionisasi. Contohnya adalah sinar alfa, sinar beta, sinar gamma dan sinar X (Gabriel, 1996).

Spektrum radiasi menggambarkan frekuensi, panjang gelombang dan energi gelombang elektromagnet. Sinar gamma memiliki panjang gelombang paling pendek, diikuti sinar X, sinar ultraviolet, sinar tampak, sinar inframerah, gelombang microwave, dan gelombang radio. Energi gelombang elektromagnet berkaitan erat dengan panjang gelombang (λ),

frekuensi (f) dan energi foton (E). Spektrum elektromagnet dapat ditulis dalam 3 persamaan yaitu :

$$\begin{aligned} \lambda &= c/f \\ E &= hc/\lambda \\ E &= hf \end{aligned} \quad (2.1)$$

dengan c adalah kecepatan cahaya ($2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$) dan h adalah konstanta Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) Persamaan tersebut menunjukkan gelombang elektromagnet frekuensi tinggi memiliki panjang gelombang pendek dan energi tinggi. Sedangkan gelombang elektromagnet frekuensi rendah memiliki panjang gelombang besar dan energi rendah (Kusky & Cullen, 2010).



Gambar 2.1 Spektrum gelombang elektromagnet (Kusky & Cullen, 2010)

2.1.1 Radiasi Pengion

Menurut Anies (2006), berdasarkan sumbernya, radiasi pengion dibedakan menjadi dua yaitu sumber radiasi alam dan sumber radiasi buatan. Sumber radiasi alam sudah ada di alam ini sejak terbentuknya bumi. Radiasi ini setiap hari memajan manusia dan merupakan sumber radiasi terbesar yang diterima oleh manusia yang tidak bekerja di tempat yang menggunakan radioaktif atau berhubungan dengan radiasi. Radiasi alam yang

diterima oleh seseorang dapat berasal dari tiga sumber utama, yaitu radiasi kosmis (berasal dari angkasa luar), radiasi terestrial (berasal dari dalam kerak bumi) dan radiasi internal(berasal dari tubuh manusia itu sendiri). Sedangkan sumber radiasi buatan contohnya radiasi sinar X, sinar gamma, sinar alfa dan sinar beta.

Berdasarkan panjang gelombang, energi dan juga frekuensinya, radiasi elektromagnetik dapat dibedakan atas radiasi pengion dan non pengion, seperti yang ditunjukkan pada spektrum elektromagnetik. Radiasi pengion mempunyai panjang gelombang lebih kecil dari 100 nm dengan energi di atas 10 eV sehingga mempunyai kemampuan untuk melakukan proses ionisasi pada molekul yang dilaluinya. Radiasi non pengion yang mempunyai panjang gelombang lebih besar, frekuensi lebih kecil dan mempunyai energi lebih rendah, tidak mampu untuk menghasilkan ion-ion ketika berinteraksi dengan materi biologik (Alatas, 2004).

Radiasi pengion dapat memindahkan sebuah elektron dari atom yang berinteraksi dengannya, menyebabkan terbentuknya ion positif dan negatif. Akibat interaksi ini adalah ionisasi. Sinar X dan sinar gamma adalah radiasi elektromagnetik yang memiliki cukup energi untuk menyebabkan ionisasi benda. Masyarakat umum terpajan ke berbagai sumber radiasi pengion dosis rendah. Sumber ini dapat bersifat alami, medis, atau buatan manusia. Sumber radiasi pengion terbesar buatan manusia yang digunakan di dunia kedokteran adalah sinar X. Sumber radiasi sinar X ini dapat dibagi menjadi dua, yaitu sinar X medis diagnostik dan kedokteran nuklir (Barbara & Billie, 2005).

Sedangkan Menurut Gabriel (1996), sinar gamma sama halnya dengan sinar X, termasuk gelombang elektromagnetik. Jika sinar gamma menembus lapisan materi setebal x maka intensitas akan berkurang menurut persamaan :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.2)$$

Dengan :

I = Intensitas sinar gamma setelah menembus materi setebal x

I_0 = Intensitas mula-mula sinar gamma

μ = koefisien serap bahan materi yang dilalui

Tebal materi yang dapat menyerap sinar gamma sehingga intensitasnya tinggal setengah dari semula dapat dinyatakan dengan rumus :

$$\text{HVL} = 0.693/\mu \quad (2.3)$$

dan disebut *Half Value Layer* (Nilai Lapisan Tengah).

Menurut Boel (2009), sinar X merupakan pancaran gelombang elektromagnetis dengan panjang gelombang yang sangat pendek. Untuk pembuatan sinar x diperlukan sebuah tabung rontgen hampa udara dimana terdapat elektron-elektron yang diarahkan dengan kecepatan tinggi pada suatu sasaran (target). Dari proses tersebut terjadi suatu keadaan dimana elektron sebagian besar dirubah menjadi panas (99%) dan sebagian kecil menjadi sinar X (1%).

Timbulnya sinar X karena ada perbedaan potensial arus searah yang besar di antara kedua elektroda (katoda dan anoda) dalam sebuah tabung hampa udara. Berkas elektron akan dipancarkan dari katoda menuju anoda. Pancaran elektron-elektron ini disebut sinar X. Arus listrik digunakan untuk memanaskan filamen sehingga filamen dapat menghasilkan elektron. Elektron-elektron ini akan dipercepat dari katoda ke anoda. Perbedaan tegangan antara katoda dan anoda dalam orde 20 KeV sampai 100 KeV. Di klinik biasanya menggunakan 80-90 KeV. Sifat-sifat sinar X adalah menghitamkan plat film, mengionisasi gas, dapat menembus berbagai zat, dan merusak jaringan (Gabriel, 1996).

Sinar gamma identik dan mempunyai sifat yang sama dengan sinar X. Keduanya merupakan gelombang elektromagnetis dan memiliki energi yang cukup tinggi untuk menimbulkan ionisasi. Perbedaannya adalah sinar X berasal dari pesawat sinar x (tabung sinar x) sedangkan sinar gamma berasal dari bahan radioaktif (Alpen, 1990).

2.1.2 Radiasi Non Pengion

Radiasi non pengion didefinisikan sebagai penyebaran atau emisi energi yang bisa melalui suatu media dan terjadi proses penyerapan. Berkas energi radiasi tersebut tidak akan mampu menginduksi terjadinya proses ionisasi dalam media tersebut. Radiasi non pengion secara fisika mengacu pada radiasi elektromagnetik dengan energi lebih kecil dari 10 eV, meliputi

sinar ultraviolet, cahaya tampak, inframerah, gelombang mikro, dan gelombang radiofrekuensi. Selain itu gelombang ultrasonik juga termasuk dalam radiasi non pengion (Anies (2006)).

Menurut Anies (2006), radiasi non pengion dapat dibagi menjadi dua, yaitu radiasi optik dengan panjang gelombang 100 nm sampai 1 mm dan radiasi radiofrekuensi elektromagnetik dengan panjang gelombang 1 mm sampai lebih dari 100 km. Kelompok radiasi optik terdiri dari tiga jenis, yaitu radiasi ultraviolet, cahaya tampak dan inframerah. Sedangkan radiasi radiofrekuensi elektromagnetik berdasarkan frekuensinya dibedakan menjadi dua jenis, yaitu gelombang mikro (frekuensi antara 30 MHz-300 GHz) dan gelombang radiofrekuensi (frekuensi antara 0,3-30 MHz).

Radiasi non pengion mempunyai panjang gelombang lebih besar, frekuensi lebih kecil dan mempunyai energi lebih rendah dari radiasi pengion, sehingga radiasi non pengion tidak mampu untuk menghasilkan ion-ion ketika berinteraksi dengan materi biologik. Istilah radiasi non pengion mengacu pada jenis radiasi elektromagnetik dengan energi lebih kecil dari 10 eV, berhubungan dengan panjang gelombang pada daerah spektrum radiasi ultraviolet, cahaya tampak, inframerah, gelombang mikro dan radiofrekuensi (Alatas, 2004).

2.2 Interaksi Radiasi Dengan Materi

Interaksi radiasi dengan materi melibatkan transfer energi dari sumber radiasi ke materi yang terkena radiasi. Materi terdiri dari dua bagian utama, yaitu inti atom dan elektron. Radiasi berinteraksi dengan inti atom atau elektron atau keduanya. Akibat yang timbul dari interaksi radiasi dengan materi tergantung dari daya tembus radiasi, jenis dan energi radiasi serta daya serap medium terhadap radiasi. Interaksi radiasi dengan materi akan menimbulkan peristiwa eksitasi dan ionisasi pada atom. Energi radiasi yang mengenai jaringan atau materi akan dikeluarkan dalam bentuk panas (Cember & Johnson, 2009). Menurut Gabriel (1996), pada peristiwa radiasi akan terjadi pemindahan atau penyerapan energi radiasi ke dalam materi atau jaringan tubuh yang diradiasi. Berdasarkan energi radiasi yang diserap maka dibagi dalam 3 proses absorpsi radiasi yaitu efek

fotolistrik, efek Compton dan pembentukan pasangan elektron (*Pair Production*).

Pada proses efek fotolistrik, energi radiasi diserap seluruhnya sehingga elektron terlepas dari lintasannya. Elektron yang dilepaskan keluar dinamakan fotoelektron dengan membawa energi kinetik sebesar E_k .

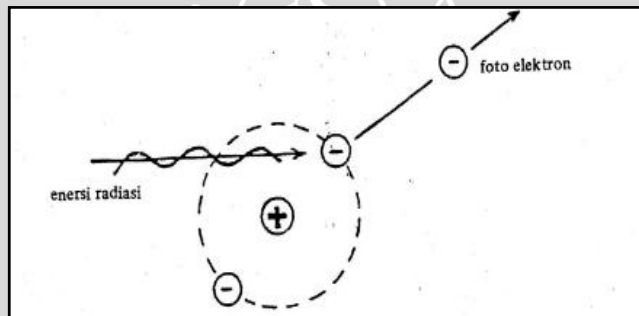
$$E_{\text{foton}} = E_k + E_i \quad (2.4)$$

Dengan :

E_{foton} = Energi sinar x atau gamma yang diperlukan untuk melepas elektron dari lintasannya

E_i = Energi ikatan elektron pada lintasannya

Efek fotolistrik ini terjadi pada penyinaran dengan energi foton yang rendah yaitu sekitar 50 KeV (Gabriel, 1996).



Gambar 2.2 Efek fotoelektrik (Gabriel, 1996)

Pembentukan sepasang elektron (*pair production*) yaitu suatu proses pembentukan positron dan elektron melalui energi radiasi sinar gamma melebihi 1,02 MeV. Proses produksi pasangan hanya terjadi jika energi radiasi lebih besar dari 1,02 MeV dan energi radiasi tersebut berhasil mendekati inti atom. Energi radiasi tersebut akan lenyap dan berubah menjadi sepasang elektron dan positron. Positron adalah partikel yang identik dengan elektron tetapi bermuatan positif. Hal ini sesuai dengan teori Einstein yang menyatakan bahwa energi ekuivalen dengan massa dan dapat ditulis dengan rumus :

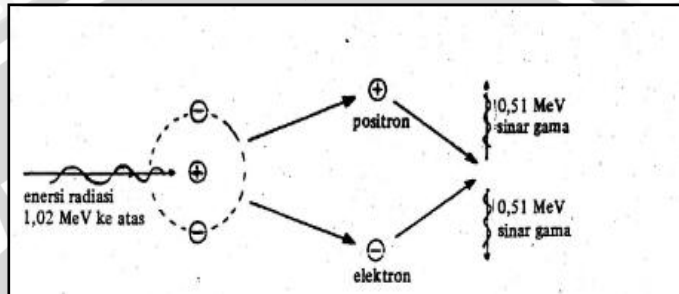
$$E=mc^2 \quad (2.5)$$

Dengan E = energi dalam erg

m = massa dalam gram

c = kecepatan gelombang elektromagnetis (3×10^{10} cm/detik)

Proses terjadinya positron dan elektron menjadi 2 sinar gamma masing-masing dengan energi 0,51 MeV dinamakan proses Anihilasi (Gabriel, 1996).



Gambar 2.3 Pembentukan sepasang elektron (Gabriel, 1996)

Efek Compton terjadi jika energi radiasi hanya sebagian saja diserap untuk melepaskan elektron dari lintasannya. Sedangkan sisa energi akan terpancar sebagai hamburan radiasi (*scattered radiation*) dengan energi yang lebih rendah daripada energi semula. Efek Compton terjadi pada elektron-elektron bebas atau terikat secara lemah pada lapisan kulit terluar. Proses ini terjadi pada penyinaran dengan energi radiasi yang lebih tinggi daripada efek fotolistrik yaitu berkisar antara 200-1000 KeV (Gabriel, 1996).

Pada peristiwa tumbukan antara foton dan elektron bebas, tidak mungkin semua energi foton akan ditransfer ke elektron. Sebagian foton akan dihamburkan. Foton hamburan ini memiliki energi yang lebih rendah atau panjang gelombang yang lebih pendek dari foton semula (Cember & Johnson, 2009).

Elektron yang terlepas dari lintasannya memiliki energi kinetik (E_k), merupakan selisih antara energi foton sinar X atau gamma (E) dengan energi foton hamburan (E'). Dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$E_k = E - E' \quad (2.6)$$

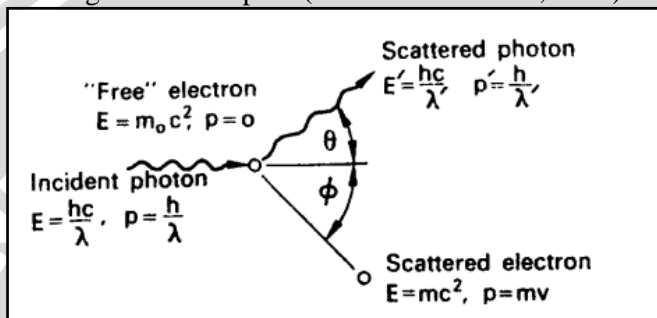
Rumus panjang gelombang untuk efek Compton dinyatakan dengan :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = h/m_0c (1 - \cos\theta) \text{ cm} \quad (2.7)$$

Jika nilai konstanta secara numerik disubstitusikan pada persamaan (2.10) dan satuan sentimeter dikonversi ke angstrom, maka diperoleh :

$$\Delta\lambda = 0,0242 (1 - \cos\theta) \text{ \AA} \quad (2.8)$$

Persamaan (2.7) diturunkan pertama kali oleh Arthur H.Compton pada tahun 1920 dan gejala yang diamatinya dikenal sebagai efek Compton (Cember & Johnson, 2009).



Gambar 2.4 Efek Compton (Cember & Johnson, 2009)

2.3 Interaksi Radiasi Dengan Sel

Setiap organ tubuh tersusun dari jaringan yang merupakan kumpulan dari sejumlah sel yang mempunyai fungsi yang sama. Sel manusia pada dasarnya tersusun dari sitoplasma dan inti sel (nukleus) yang keduanya dilindungi oleh suatu membran sel yang memungkinkan terjadinya komunikasi antar sel dan mengatur transportasi bahan-bahan keluar masuk sel. Sitoplasma mengandung sejumlah organel sel yang berfungsi mengatur berbagai fungsi metabolisme penting sel. Sedangkan inti sel mengandung suatu struktur biologik yang sangat kompleks yang disebut kromosom yang mempunyai peranan penting sebagai tempat penyimpanan semua informasi genetika yang berhubungan dengan keturunan atau karakteristik dasar manusia (Alatas, 2004).

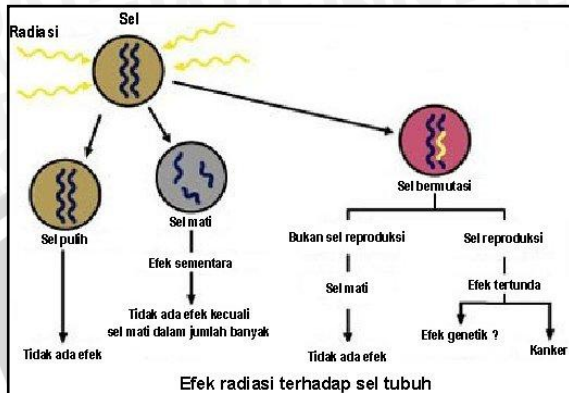
Radiasi non pengion merupakan pancaran energi yang tidak mampu menyebabkan terjadinya proses ionisasi pada materi biologik. Interaksi radiasi non pengion, khususnya pada rentang radiasi optik, dengan materi biologik umumnya menimbulkan reaksi panas/termal dan reaksi fotokimia.

Mekanisme kerusakan akibat suhu membutuhkan energi yang cukup yang diserap oleh jaringan dalam waktu singkat menimbulkan peningkatan suhu yang nyata/berpengaruh pada jaringan normal. Reaksi fotokimia terjadi ketika sebuah foton mempunyai energi kuantum yang cukup untuk menginisiasi terjadinya eksitasi yang merubah suatu molekul menjadi satu atau lebih molekul kimia yang berbeda (Alatas, 2004).

Radiasi pengion dapat mencederai sel atau menyebabkan kematian sel secara langsung dengan merusak membran sel dan menyebabkan pembengkakan intrasel sehingga terjadi lisis (pecah) sel. Radiasi pengion juga secara tidak langsung merusak ikatan antara pasangan-pasangan basa molekul DNA. Rusaknya ikatan tersebut menyebabkan kesalahan replikasi atau transkripsi DNA. Kesalahan tersebut mungkin dapat diperbaiki, namun jika tidak maka dapat menyebabkan kematian sel terprogram atau timbulnya kanker akibat hilangnya kontrol genetik atas pembelahan sel (Corwin, 2009).

Radiasi pengion juga dapat menyebabkan terbentuknya radikal bebas baik secara langsung atau akibat cedera sel dan peradangan. Radikal bebas adalah suatu atom atau molekul yang sangat reaktif dengan elektron yang tidak memiliki pasangan. Radikal bebas dapat merusak membran sel atau DNA sel yang rentan. Kerusakan DNA akibat radikal bebas diduga berkontribusi terhadap perkembangan beberapa kanker (Corwin, 2009).

Jika radiasi mengenai tubuh manusia, ada 2 kemungkinan yang dapat terjadi: berinteraksi dengan tubuh manusia, atau hanya melewati saja. Jika berinteraksi, radiasi dapat mengionisasi atau dapat pula mengeksitasi atom. Setiap terjadi proses ionisasi atau eksitasi, radiasi akan kehilangan sebagian energinya. Energi radiasi yang hilang akan menyebabkan peningkatan temperatur (panas) pada bahan (atom) yang berinteraksi dengan radiasi tersebut.



Gambar 2.5 Efek radiasi terhadap sel tubuh

(http://www.batan.go.id/pusdiklat/elearning/proteksi_radiasi/pengenalan_radiasi/2-3.htm)

Radiasi pengion dapat berinteraksi dengan sel melalui dua cara, yaitu interaksi secara langsung dan interaksi secara tidak langsung. Interaksi secara langsung adalah radiasi mengenai sel penyusun tubuh sehingga radiasi tersebut langsung memapar sel dan menyebabkan terjadinya ionisasi dan eksitasi. Hal ini mengakibatkan kerusakan inti sel beserta komponennya, termasuk DNA. Sedangkan secara tidak langsung, radiasi mengenai komponen air yang terdapat dalam sel sehingga terbentuk radikal bebas. Radikal bebas yang terbentuk dapat memicu kematian sel dan menimbulkan mutasi DNA (Cember & Johnson, 2009).

Interaksi antara radiasi dengan sel hidup merupakan proses yang berlangsung secara bertahap. Proses ini diawali dengan tahap fisik dan diakhiri dengan tahap biologik. Ada empat tahapan interaksi, yaitu tahap fisik, tahap fisikokimia, tahap kimia dan biologi serta tahap biologi.

1. Tahap fisik

Interaksi radiasi dengan materi biologi diawali dengan terjadinya interaksi fisik yaitu terjadinya proses eksitasi dan/ atau ionisasi, yang terjadi dalam waktu 10-15 detik setelah paparan radiasi. Ionisasi awal yang terjadi didalam sel adalah terurainya molekul air menjadi ion positif H_2O^+ dan e^- ion negatif. Proses ionisasi dapat dituliskan sebagai berikut :



Eksitasi adalah perpindahan elektron dari kulit dalam ke kulit luar dengan syarat mendapatkan energi yang cukup dari luar. Ionisasi terjadi jika radiasi dengan energi yang cukup besar melintas mendekati ataupun menumbuk suatu atom dan menyebabkan terlemparnya elektron keluar dari orbitnya.

2. Tahap fisikokimia

Tahap fisikokimia adalah tahapan dimana atom atau molekul yang tereksitasi atau terionisasi mengalami reaksi-reaksi sehingga terbentuk radikal bebas yang tidak stabil. Ion-ion pada tahap pertama (tahap fisik) akan bereaksi dengan molekul air lainnya sehingga menghasilkan beberapa macam produk diantaranya radikal bebas yang sangat reaktif dan toksik melalui radiolisis air yaitu H^+ dan OH^- . Reaksi kimia yang terjadi dalam tahap kedua interaksi ini adalah:



OH^* dan H^* merupakan radikal bebas dan berinteraksi dengan berbagai molekul dalam tubuh sehingga menimbulkan kerusakan. Beberapa radikal bebas OH^* dapat membentuk peroksida (H_2O_2) yang bersifat oksidator kuat dan merusak sel melalui reaksi berikut :



Sedangkan radikal bebas H^* dapat berikatan dengan oksigen yang terlarut dalam air membentuk hidroperoksil (HO_2) yang bersifat radikal, tetapi tidak reaktif seperti OH^* . Reaksinya dapat dituliskan sebagai berikut :



3. Tahap kimia dan biologi

Tahap kimia dan biologi berlangsung dalam beberapa detik dan ditandai dengan terjadinya reaksi antara radikal bebas dan peroksida dengan molekul organik sel serta inti sel yang terdiri atas kromosom. Reaksi ini akan menyebabkan terjadinya kerusakan-kerusakan terhadap molekul-molekul dalam sel. Jenis kerusakannya bergantung pada jenis molekul yang bereaksi. Jika reaksi itu terjadi dengan molekul protein, ikatan rantai panjang molekul akan putus sehingga protein rusak.

Molekul yang putus ini menjadi terbuka dan dapat melakukan reaksi lainnya. Radikal bebas dan peroksida juga dapat merusak struktur biokimia molekul enzim sehingga fungsi enzim terganggu. Kromosom dan molekul DNA di dalamnya juga dapat dipengaruhi oleh radikal bebas dan peroksida sehingga terjadi mutasi genetik.

4. Tahap biologi

Tahap biologis yang ditandai dengan terjadinya tanggapan biologis yang bervariasi bergantung pada molekul penting mana yang bereaksi dengan radikal bebas dan peroksida yang terjadi pada tahap ketiga. Proses ini berlangsung dalam orde beberapa puluh menit hingga beberapa puluh tahun, bergantung pada tingkat kerusakan sel yang terjadi. Beberapa akibat dapat muncul karena kerusakan sel, seperti kematian sel secara langsung, pembelahan sel terhambat atau tertunda serta terjadinya perubahan permanen pada sel anak setelah sel induknya membelah. Kerusakan yang terjadi dapat meluas dari skala seluler ke jaringan, organ dan dapat pula menyebabkan kematian.

Menurut Corwin (2009), sel yang paling rentan terhadap kerusakan akibat radiasi pengion adalah sel yang sering mengalami pembelahan, termasuk sel pencernaan, sel integumen (kulit dan rambut), dan sel pembentuk darah di sumsum tulang belakang.

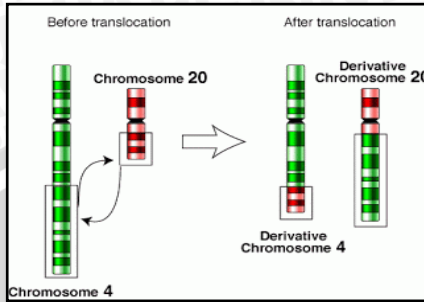
Sensitivitas berbagai jaringan tumor terhadap radiasi juga tidak sama tergantung dari jaringan apa tumor itu berasal. Dalam hal ini harus berpegang pada hukum Bergonie dan Tribondeau. Bergonie dan Tribondeau (1906) melakukan penyinaran pada testis binatang percobaan dan diperoleh kesimpulan bahwa sel embrional lebih sensitif terhadap radiasi. Kesimpulan ini dikenal sebagai hukum Bergonie-Tribondeau yang sangat penting dalam radioterapi. Hukum ini menyebutkan bahwa makin aktif suatu sel berproliferasi (memperbanyak diri dengan cara pembelahan) maka makin sensitif pula sel tersebut terhadap radiasi. Sel-sel tumor ganas pada umumnya dalam keadaan proliferasi aktif sehingga lebih sensitif terhadap radiasi daripada sel-sel sehat di sekitarnya (Gabriel, 1996).

2.3.1 Interaksi Radiasi dengan Kromosom

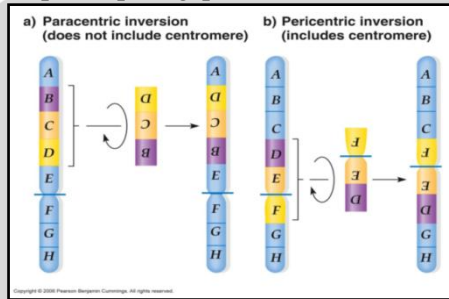
Kromosom terbentuk dari molekul DNA dan protein yang disebut histon. Kromosom manusia berjumlah 23 pasang mengandung kurang lebih 150 ribu gen yang merupakan suatu rantai pendek dari DNA yang membawa kode informasi genetik tertentu dan spesifik. Sel somatik (tubuh) memiliki 23 pasang kromosom yang dalam setiap pasangannya terdiri atas 2 kromosom, masing-masing berasal dari orang tua sehingga jumlah totalnya adalah 46 kromosom. Setiap sel genetik (sel telur dan sel sperma) memiliki 23 kromosom tunggal (Corwin, 2009).

Kromosom terdiri dari dua lengan (telomer) yang dihubungkan satu sama lain dengan suatu penyempitan yang disebut sentromer. Radiasi menyebabkan terjadinya perubahan pada jumlah dan struktur kromosom (aberasi kromosom) yang memungkinkan timbulnya kelainan genetik. Peluang kerusakan struktur kromosom berupa patahnya lengan kromosom yang terjadi secara acak semakin besar dengan meningkatnya dosis radiasi (Diklat, 2005).

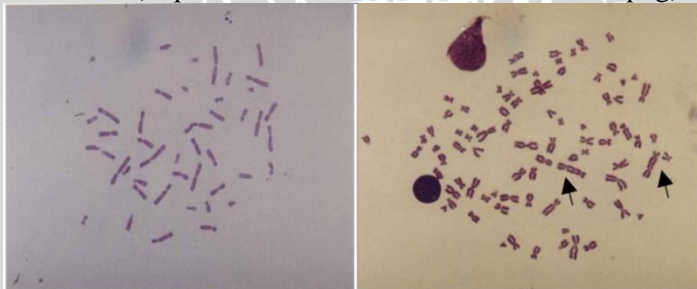
Bentuk aberasi kromosom yang dapat timbul akibat radiasi adalah translokasi, inversi, disentrik dan ring. Translokasi adalah terjadinya perpindahan fragmen antar lengan dari kromosom yang sama atau dari dua kromosom. Inversi adalah hasil dari delesi atau pematahan pada lengan kromosom, kemudian patahan ini bergabung kembali dengan kromosom akan tetapi posisinya tertukar. Disentrik adalah kromosom dengan dua buah sentromer sebagai hasil dari penggabungan dua kromosom yang mengalami patahan. Ring adalah hasil penggabungan lengan kromosom dari satu kromosom yang sama (Diklat, 2005).



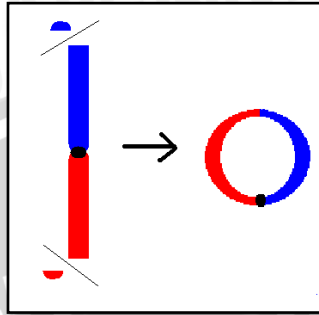
Gambar 2.6 Translokasi kromosom
 (<http://3.bp.blogspot.com//translocation.gif>)



Gambar 2.7 Inversi kromosom
 (<http://classconnection.s3.com/inversions.png>)



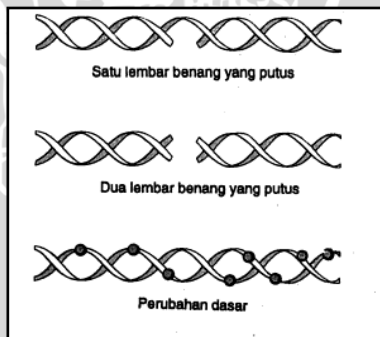
Gambar 2.8 (A) Kromosom normal (kiri) (B) kromosom disentrik, tanda panah (kanan) (Lusiyaniti, dkk., 2010)



Gambar 2.9 Kromosom ring
 (http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/00/Ring_chromosome.gif)

2.3.2 Interaksi Radiasi dengan DNA

Kerusakan pada DNA sebagai akibat radiasi dapat menyebabkan terjadinya perubahan struktur molekul gula atau basa, putusya ikatan hidrogen antar basa, hilangnya gula atau basa dan lainnya. Kerusakan yang lebih parah adalah putusya salah satu untai DNA yang disebut *single strand break* dan putusya kedua untai DNA pada posisi yang berhadapan, yang disebut *double strand breaks*.



Gambar 2.10 Kerusakan DNA (Underwood, 1994)

Secara alamiah sel mempunyai kemampuan untuk melakukan proses perbaikan terhadap kerusakan DNA dalam batas normal. Perbaikan dapat berlangsung tanpa kesalahan sehingga struktur DNA kembali seperti semula dan tidak menimbulkan perubahan fungsi pada sel. Tetapi bila kerusakan

yang terjadi terlalu banyak yang melebihi kapasitas kemampuan proses perbaikan, maka perbaikan tidak dapat berlangsung dengan secara tepat dan sempurna sehingga menghasilkan DNA dengan struktur yang berbeda, yang dikenal dengan mutasi.

Radiasi dapat mengakibatkan putusnya benang DNA. Apabila hanya satu benang yang putus, biasanya perbaikan berlangsung dengan baik. Tetapi jika dua benang, tidak mungkin terjadi perbaikan karena tidak ada dasar sambungannya. Perubahan dasar juga sering ditemukan, yaitu benang DNA tidak dapat menyalin secara benar. Hasilnya mungkin tidak dapat dibaca atau dibaca secara salah. Akibat kerusakan DNA tergantung dari sifat dan hasil perbaikan. Sel mamalia apabila mendapat penyinaran sekitar 1,5 Gy akan mengalami kerusakan hebat pada dasar, sekitar 1000 benang akan putus dan dua per tiga sel akan mati (Underwood, 1994).

2.4 Radioterapi

Radioterapi atau teleterapi (Keputusan Kepala Bapeten Nomor: 21/Ka-BAPETENIXII-02, Pasal 1) adalah suatu cara untuk menyembuhkan atau mengurangi rasa sakit pada penderita penyakit keganasan (kanker) dengan menggunakan radiasi pengion. Radioterapi menggunakan radiasi pengion, seperti sinar X atau sinar gamma. Pada pengobatan radioterapi tidak digunakan sumber radioaktif pada tubuh pasien. Sinar pengion tersebut ditujukan untuk membunuh sel tumor atau kanker tetapi meminimalisir efek pada sel normal atau sehat. Ada beberapa teknik dalam pengobatan radioterapi, yaitu *linear accelerators* (Linac), *cobalt machines*, atau *ortho-voltage x-ray machines*. Pada radioterapi dilakukan *planning*, simulasi baru kemudian penyinaran untuk meningkatkan rasio keberhasilan radioterapi (Hoskin, 2006).

Radioterapi telah banyak digunakan untuk mengobati pasien kanker. Sebanyak 65% dari pasien kanker melakukan radioterapi sebagai salah satu cara pengobatan kanker bagi mereka. Radioterapi membunuh sel kanker dengan merusak DNA sel kanker. Meskipun sel normal di sekitar sel kanker juga terkena efek radiasi, akan tetapi sel normal memiliki kemampuan regenerasi yang lebih baik daripada sel kanker.

Isotop radioaktif yang dipakai dalam radioterapi misalnya ^{60}Co dan ^{137}Cs . ^{60}Co dibuat dalam reaktor nuklir dengan menembaki unsur Cobalt yang stabil dengan neutron sehingga menjadi zat radioaktif dengan waktu paruh 5,3 tahun dan memancarkan sinar gamma 1,33 MeV. Demikian pula ^{137}Cs adalah produk dari uranium dalam reaktor nuklir dengan waktu paruh 30 tahun dan memancarkan sinar gamma 0,662 MeV (Gabriel, 1996).

Respon jaringan terhadap terapi radiasi berbeda-beda. Jaringan yang cepat membelah lebih mudah dicerai oleh radiasi, tetapi kemampuan regenerasinya juga relatif cepat. Sedangkan respon tumor terhadap radiasi tergantung dari ukuran fraksi, dosis total, interval antara fraksi, dan lama total terapi. Pada umumnya dosis mematikan bagi tumor yang diperlukan manusia berkisar antara 2000 rad dalam 2 minggu sampai 8000 rad dalam 8 minggu. Fraksi harian dalam rentang 200 rad dalam 3 sampai 5 fraksi yang diberikan tiap minggu. Dosis dan fraksinasi dimodifikasi lebih lanjut menurut jenis tumor, stadium penyakit dan tujuan radiasi kuratif atau paliatif (Sabiston, 1995).

Penyinaran radioterapi dilakukan secara seri selama beberapa hari dalam seminggu. Penyinaran ini dinamakan dosis fraksional. Fraksi dilakukan sekali dalam sehari selama 5 hari dalam seminggu. Selama 2 hari dalam seminggu tidak dilakukan penyinaran untuk memberikan kesempatan pada sel untuk regenerasi. Kondisi sel normal yang terkena radiasi tergantung dari kemampuan sel tersebut melakukan regenerasi. Selain itu juga tergantung dari tipe sel dan dosis radiasi yang diterima. Jika sel tersebut gagal melakukan regenerasi maka efek yang terjadi bersifat permanen atau terjadi kematian sel.

Radioterapi untuk suatu tumor dikatakan berhasil apabila dapat membunuh sel tumor secara maksimal dengan efek samping minimal pada jaringan normal di sekitarnya. Tingkat keberhasilan pengobatan dengan menggunakan radiasi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya letak topografi tumor, besar atau volume tumor, dan jenis radiosensitivitas sel tumor terhadap radiasi pengion. Untuk

mendapatkan hasil terapi radiasi yang maksimal diperlukan teknik penyinaran yang baik dan akurat.

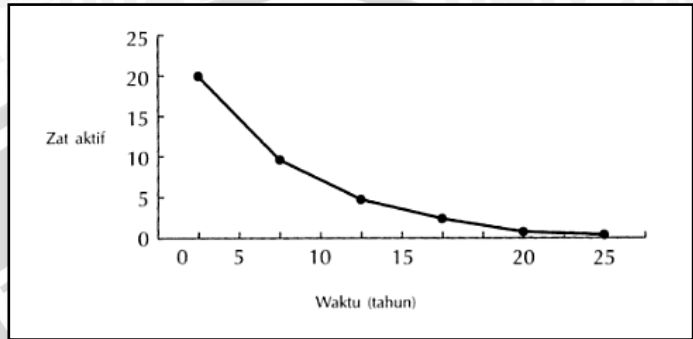
Radioterapi ada dua macam yaitu, external radioterapi dan internal radioterapi. External radioterapi adalah radioterapi yang penyinarannya dilakukan dengan pesawat teleterapi Cobalt 60 atau *linear accelerator* (LINAC). Sedangkan internal radioterapi biasa juga disebut dengan brachyterapi atau radioterapi jarak dekat, dilakukan dengan memasang implan yang berisi sumber radioaktif ke dalam tubuh pasien pada area yang terkena tumor atau kanker (Lemoigne & Caner, 2009).

2.5 Peluruhan Cobalt 60

Peluruhan bahan radioaktif menghasilkan sinar gamma berenergi tinggi yang dapat digunakan untuk pengobatan teleterapi. Saat ini untuk teleterapi biasa menggunakan sumber Cobalt 60. Cobalt 60 (^{60}Co) dapat dihasilkan dengan menempatkan ^{59}Co pada suatu medan neutron yang kuat, inti atom akan menyerap neutron dan membentuk ^{60}Co . Cobalt 60 akan mengalami peluruhan dan menghasilkan Nikel 60 dengan waktu paruh 5,26 tahun. Peluruhan ini juga menghasilkan partikel β^- dengan energi 0,31 MeV (maksimal) dan dua sinar gamma dengan energi 1,17 MeV dan 1,33 MeV (Cherry & Duxbury, 2009).

Radioisotop tidak memancarkan radiasi dengan kecepatan sama. Aktivitasnya semakin lama akan semakin menurun (meluruh). Waktu yang diperlukan sampai jumlah radioisotop menjadi separuhnya disebut waktu paruh. Kecepatan waktu paruh radioisotop bervariasi. Cobalt 60 memiliki waktu paruh 5,3 tahun. Pengukuran lain yang berhubungan adalah waktu paruh biologis. Pengukuran ini juga mengukur waktu yang diperlukan hingga zat berkurang menjadi separuh, tetapi disebabkan proses biologis (eliminasi cairan tubuh). Jika terapi menggunakan zat radioaktif, maka waktu paruh biologis ini juga harus diperhitungkan dalam pengukuran dosis karena produk hasil eliminasi ini juga mengandung zat radioaktif. Produk eliminasi yang bersifat radioaktif ini memancarkan radiasi sehingga harus ditangani secara khusus agar tidak membahayakan tenaga medis yang menangani dan

juga keluarga atau orang-orang yang berhubungan dengan pasien (James, dkk.,2008).



Gambar 2.11 Peluruhan radioaktif Cobalt 60 (James, dkk., 2008)

Inti atom radioaktif adalah inti atom yang bersifat tidak stabil. Sebuah inti atom radioaktif secara spontan melepaskan satu atau lebih partikel dalam proses transformasi untuk menjadi atom yang lebih stabil. Terdapat hubungan antara jumlah N atom bahan radioaktif dengan waktu t , yaitu :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.15)$$

dimana N_0 adalah jumlah inti mula-mula, N adalah jumlah inti setelah waktu t , $e = 2,718$ dan λ yaitu konstanta peluruhan, berhubungan dengan waktu paro $t_{1/2}$, yaitu :

$$t_{1/2} = 0,693/\lambda \quad (2.16)$$

Konstanta peluruhan memiliki satuan det^{-1} disebut sebagai laju disintegrasi bagian. Sedangkan laju disintegrasi adalah $\Delta N/\Delta t$, disebut juga sebagai aktivitas sampel. Aktivitas sampel dapat dinyatakan dengan :

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.17)$$

dimana A_0 adalah aktivitas inti mula-mula dan A adalah aktivitas inti setelah waktu t . Aktivitas sampel berkurang secara tetap seiring dengan berjalannya waktu. Satuan untuk aktivitas adalah Becquerel (Bq), dimana $1 \text{ Bq} = 1 \text{ peluruhan} / \text{detik}$ (Bueche & Hecht, 2006).

2.6 Teleterapi Cobalt 60

Teleterapi berasal dari kata tele (jauh) dan terapi (penyembuhan). Teleterapi dapat diartikan terapi yang

dilakukan dari jauh dengan menggunakan radiasi yang dipancarkan oleh suatu sumber radiasi (pesawat Rontgen, Linac, Cobalt 60, dan sumber radio aktif yang lain). Pemberian radiasi pada teleterapi dilakukan dengan meletakkan sumber radiasi pada suatu jarak tertentu (80 cm sampai 100 cm) dari tubuh pasien, sedangkan radiasi diarahkan pada lokasi jaringan kanker.

Pada tahun 1951, untuk pertama kalinya diproduksi sumber Cobalt 60 pada suatu reaktor nuklir di Kanada. Sumber ini yang menjadi awal mula pemanfaatan Cobalt 60 untuk radioisotop teleterapi, menggantikan radioisotop Radium. Dalam penggunaannya Cobalt 60 memberikan dosis yang kecil pada permukaan tubuh (fantom), dan dosis maksimum pada kedalaman di bawah permukaan tubuh. Beberapa kelemahan Cobalt 60 antara lain diperlukan pemeriksaan bulanan untuk mengetahui peluruhannya dan sumber harus diganti setiap lima tahun.

Badan pesawat teleterapi Cobalt 60 terbuat dari container baja dengan selubung timbal. Di sekitar bagian tengah kepalanya tersimpan sumber Cobalt 60 dan *source device* yang mengatur posisi sumber jika akan digunakan. Pesawat teleterapi Cobalt 60 perawatannya lebih mudah dan lebih efisien dibanding dengan pesawat teleterapi elektron yang lain, juga memiliki cara kerja yang sederhana. Untuk memaparkan radiasi hanya dengan membuka kolimator (semacam lensa optik) pada ukuran tertentu bergantung pada luas lapangan radiasinya. *Device source* digerakkan hingga sumber mengarah dan mendekat ke bukaan kolimator. Tidak diperlukan pembangkit listrik untuk stimulasi paparan, juga tidak diperlukan pemercepat partikel (Waryono & Triyani, 2011).

Pesawat teleterapi Co 60 setiap tahun terjadi penyimpangan sebesar $\pm 5\%$, oleh sebab itu perlu dikalibrasi setiap 6 bulan. Penyimpangan ini terjadi karena geometri dari isotop yang berbentuk silinder, serta berkas radiasi yang digunakan adalah berkas terkolimasi (Waryono & Triyani, 2011).



Gambar 2.12 Pesawat teleterapi Cobalt 60
(<http://images1.hellotrade.com/products-radiotherapy-equipments-tr-cobalt-60-teletherapy.jpg>)

Dalam aplikasi radioterapi Co-60, teknik yang digunakan adalah teknik radiasi eksternal atau teleterapi. Sumber sinar berupa sinar-X atau radioisotop yang ditempatkan di luar tubuh. Sinar diarahkan ke tumor yang akan diberi radiasi. Besar energi yang diserap oleh suatu tumor tergantung dari besarnya energi yang dipancarkan oleh sumber energi, jarak antara sumber energi dan tumor, dan kepadatan massa tumor. Teleterapi umumnya diberikan secara fraksional dengan dosis 150-250 rad per hari, dalam 2-3 seri. Diantara seri 1-2 atau 2-3 diberi istirahat 1-2 minggu untuk pemulihan keadaan penderita sehingga radioterapi memerlukan waktu 4-6 minggu.

Sinar yang dipakai untuk radioterapi Cobalt adalah sinar gamma. Sinar gamma merupakan sinar elektromagnetik atau foton. Sinar ini dapat menembus tubuh. Daya tembusnya tergantung dari besar energi yang menimbulkan sinar itu. Makin tinggi energinya atau makin tinggi voltagenya, makin besar daya tembusnya dan makin dalam letak dosis maksimalnya.

2.7 Dosis Radiasi

Dosis adalah besaran yang digunakan untuk mengukur sebuah pancaran radiasi. Dosis radiasi adalah jumlah radiasi yang terdapat dalam medan radiasi atau jumlah radiasi yang diserap atau diterima oleh materi. Dosis radiasi dibagi menjadi

4 yaitu, dosis serap, dosis ekuivalen, dosis efektif dan paparan radiasi.

2.7.1 Dosis Serap

Dosis serap adalah banyaknya energi radiasi pengion yang terserap per satuan massa bahan. Besar dosis terserap yang sama untuk jenis radiasi yang berbeda belum tentu mengakibatkan efek biologis yang sama. Karena setiap jenis radiasi pengion mempunyai keunikan masing-masing dalam berinteraksi dengan jaringan tubuh. Rumus dosis serap dinyatakan sebagai berikut :

$$D = \frac{\text{Energi terserap}}{\text{Massa Penyerap}} = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (2.18)$$

Satuan dosis serap adalah Gray (Gy). 1 Gy = 100 rad.

Dosis serap adalah pengukuran radiasi yang berhubungan dengan radioterapi. Definisi dosis serap adalah jumlah energi terserap per satuan massa penyerap. Satuan Gray (Gy) menunjukkan jumlah radiasi yang menyebabkan 1 Joule energi diserap per 1 kg massa yang diradiasi. 1 Gy = 1 J/kg. 1 Gy = 100 cGy = 100 Rad (Beyzadeoglu, dkk., 2010).

Kecepatan dosis serap diukur dalam satuan Gray per menit. Pada umumnya, dosis serap digunakan untuk mendefinisikan jumlah radiasi yang diberikan pada suatu titik tertentu pada lapangan radiasi. Definisi tersebut juga mencakup hilangnya sebagian energi yang diserap. Dapat juga diartikan konsentrasi energi yang diberikan pada suatu pengukuran. Konsep dosis serap berlaku untuk semua radiasi pengion dan berbagai material (Roberts & William, 2007).

2.7.2 Dosis Ekuivalen

Dosis yang sama tetapi berasal dari jenis radiasi yang berbeda akan memberikan efek yang berbeda pada sistem tubuh. Dosis ekuivalen berkaitan dengan efek biologi. Dosis ekuivalen merupakan hasil perkalian antara dosis serap (D) dengan faktor bobot radiasi (W_R), dinyatakan sebagai berikut :

$$H_T = W_R \cdot D \quad (2.19)$$

Satuan dosis ekuivalen adalah Sievert (Sv). 1 Sievert = 100 Rem atau setara dengan 1 J/kg.

Menurut SK No.01/Ka.BAPETEN/V.1999, nilai faktor bobot radiasi (W_R) ditunjukkan pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Nilai Faktor Bobot Radiasi (W_R)

No	Jenis Radiasi	Bobot Radiasi (W_R)
1	Foton untuk semua energi	1
2	Elektron dan muon, untuk semua energi	1-5
3	Neutron a. Termal b. Energi tidak diketahui c. Cepat	5 10 20
4	Proton, selain proton recoil dengan energi > 2 MeV	5
5	a. Partikel Alpha, fragmen fisi, inti berat b. Sinar x dan gamma	20 1

2.7.3 Dosis Efektif

Dosis efektif adalah besaran yang menunjukkan keefektifan radiasi dalam menimbulkan efek tertentu pada suatu organ. Satuan dosis efektif adalah Sievert. Dosis efektif (H_E) dalam organ yang menerima penyinaran radiasi dengan dosis ekuivalen (H_T) dituliskan sebagai berikut :

$$H_E = W_T \cdot H_T \quad (2.20)$$

W_T adalah faktor bobot organ. Menurut SK No.01/Ka.BAPETEN/V.1999, nilai faktor organ (W_T) ditunjukkan pada tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Nilai Faktor Organ (W_T)

Organ atau jaringan tubuh	W_T^*	W_T^{**}
Kelamin (gonad)	0,25	0,20
Sumsum tulang	0,12	0,12
Usus besar (colon)	-	0,12
Paru-paru	0,12	0,12
Lambung	-	0,12
Ginjal	-	0,05
Payudara	-	0,05
Hati	-	0,05
Kerongkongan (esofagus)	-	0,05

Kelenjar gondok (thyroid)	0,03	0,05
Kulit	-	0,01
Tulang	0,03	0,01
Dada	0,15	-
Organ lainnya	0,30	0,05

*Nilai W_T menurut SK No.01/Ka.BAPETEN/V.1999

** Nilai W_T menurut ICRP No.60 (1990)

2.7.4 Paparan Radiasi

Paparan radiasi adalah pancaran radiasi yang diterima oleh suatu medium yang terkena radiasi. Satuan paparan radiasi adalah Rontgen (R). Paparan radiasi dituliskan sebagai berikut :

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2.21)$$

Dengan dQ adalah perbedaan muatan dan dm adalah perbedaan massa.

Paparan radiasi untuk sinar X dan sinar gamma dapat dinyatakan dalam satuan SI Coloumb/kg (C/kg). Tetapi satuan ini hanya digunakan untuk pengukuran paparan radiasi pada medium udara saja. Efek paparan radiasi ini menimbulkan ionisasi di udara (Sherer, dkk., 2013).

Paparan radiasi menunjukkan jumlah ionisasi yang dihasilkan oleh foton di udara. Karena tidak memungkinkan melakukan pengukuran secara langsung dosis serap pada jaringan, maka pengukuran radiasi dilakukan di udara. Paparan radiasi adalah jumlah radiasi yang diperlukan untuk melepaskan sebuah ion positif atau negatif pada 1 cm^3 udara, temperatur dan tekanan standart (sebanyak $2,08 \times 10^9$ ion). Pada kondisi udara normal (0° C dan 760 mmHg), radiasi sinar X dan sinar gamma menghasilkan $2,58 \times 10^{-4}$ Coloumb ion per 1 kg pada medium udara (Beyzadeoglu, dkk., 2010).

2.7.5 LET (*Linear Energy Transfer*)

LET (*Linear Energy Transfer*) merupakan laju linear energi yang diabsorpsi oleh medium penyerap oleh partikel pengion yang menembus medium. LET digunakan untuk mengukur laju penyerapan energi dan didefinisikan sebagai :

$$\text{LET} = dE_L/dl \quad (2.22)$$

dimana dE_L adalah rata-rata energi yang melewati medium penyerap sebagai partikel pengion dan dl adalah jarak yang dilintasi oleh energi. Satuan LET adalah kilo elektron volt per micron ($keV/\mu m$) (Cember & Johnson, 2009).

2.7.6 RBE (*Relative Biological Effectiveness*)

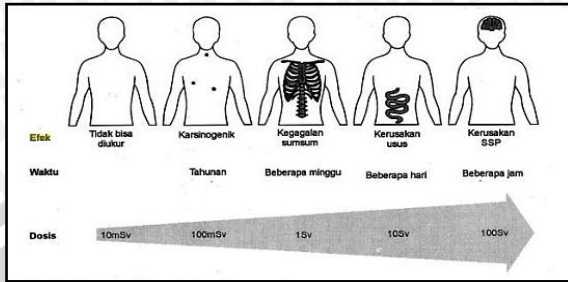
Radiasi memberikan efek biologis yang tidak sama. Sumber radiasi yang berbeda memberikan efek biologis yang berlainan. RBE adalah perbandingan dosis serap oleh radiasi pembanding (biasanya radiasi sinar gamma dari Cobalt 60), D_R dengan dosis serap radiasi lain, D_X yang memberikan efek biologis yang sama, dinyatakan dengan :

$$RBE_X = D_R / D_X \quad (2.23)$$

RBE ini berhubungan dengan faktor bobot radiasi (W_R) yang digunakan pada dosis ekuivalen. Tetapi RBE dan W_R tidak sama. RBE digunakan untuk menyatakan tingkat efek biologis radiasi, sedangkan W_R biasanya digunakan dalam proteksi radiasi (Alpen, 1990).

2.8 Efek Radiasi

Radiasi sinar x atau sinar gamma dapat membahayakan bagi tubuh. Efek radiasi terhadap tubuh manusia bergantung pada seberapa banyak dosis yang diberikan dan bergantung pula pada lajunya, apakah diberikan secara akut (dalam jangka waktu seketika) atau secara gradual (sedikit demi sedikit). Sebagai contoh, radiasi gamma dengan dosis 2 Sv (200 rem) yang diberikan pada seluruh tubuh dalam waktu 30 menit akan menyebabkan pusing dan muntah-muntah pada beberapa persen manusia yang terkena dosis tersebut, dan kemungkinan satu persen akan meninggal dalam waktu satu atau dua bulan kemudian. Untuk dosis yang sama tetapi diberikan dalam rentang waktu satu bulan atau lebih, efek sindroma radiasi akut tersebut tidak terjadi.



Gambar 2.13 Akibat radiasi seluruh tubuh (Underwood, 1994)

2.8.1 Efek Stokastik dan Efek Deterministik

Bila ditinjau dari dosis radiasi (untuk kepentingan proteksi radiasi), efek radiasi dibedakan menjadi dua jenis yaitu efek stokastik dan efek non stokastik (deterministik). Efek stokastik adalah efek radiasi yang tidak langsung terlihat. Jika dosisnya rendah, atau diberikan dalam jangka waktu yang lama (tidak sekaligus), kemungkinan besar sel-sel tubuh akan memperbaiki dirinya sendiri sehingga tubuh tidak menampilkan tanda-tanda bekas terkena radiasi. Namun demikian, bisa saja sel-sel tubuh sebenarnya mengalami kerusakan, dan akibat kerusakan tersebut baru muncul dalam jangka waktu yang sangat lama (mungkin berpuluh-puluh tahun kemudian), dikenal juga sebagai periode laten. Efek stokastik ini tidak dapat dipastikan akan terjadi, namun probabilitas terjadinya akan semakin besar apabila dosisnya juga bertambah besar dan dosisnya diberikan dalam jangka waktu seketika. Efek stokastik ini mengacu pada penundaan antara saat pemaparan radiasi dan saat penampakan efek yang terjadi akibat pemaparan tersebut. Salah satu penyakit yang termasuk dalam kategori ini adalah kanker.

Efek deterministik adalah efek radiasi yang langsung terlihat. Efek ini hanya muncul jika dosis radiasinya melebihi suatu batas tertentu, disebut dosis ambang. Efek deterministik bisa juga terjadi dalam jangka waktu yang agak lama setelah terkena radiasi, dan umumnya tidak berakibat fatal. Sebagai contoh, katarak dan kerusakan kulit dapat terjadi dalam waktu beberapa minggu setelah terkena dosis radiasi 5 Sv atau lebih.

Efek deterministik timbul sebagai akibat dari proses kematian sel akibat paparan radiasi yang mengubah fungsi jaringan/organ terpajan. Efek ini timbul bila dosis yang diterima di atas dosis ambang (threshold dose) dan umumnya timbul beberapa saat setelah terpajan. Tingkat keparahannya akan meningkat bila dosis yang diterima lebih besar dari dosis ambang. Tetapi sebenarnya, tidak ada batasan dosis ambang untuk dapat menimbulkan perubahan pada sistem biologik. Serendah apapun dosis radiasi selalu berisiko menimbulkan perubahan pada sistem biologik baik pada tingkat molekul maupun seluler. Dengan demikian, paparan radiasi dosis rendah pada jaringan dapat meningkatkan resiko kanker yang secara statistik dapat dideteksi pada suatu populasi, namun tidak secara serta merta terkait dengan paparan individu. Semua efek yang terdeteksi secara statistik ini disebut efek stokastik karena sifatnya yang acak. Dengan demikian, pada efek stokastik ini, tidak ada dosis ambang dan akan muncul setelah masa laten yang lama. Peluang terjadinya efek stokastik lebih besar pada dosis yang lebih tinggi, namun keparahannya tidak bergantung pada dosis (Alatas, 2004).

2.8.2 Efek Biologis

Radioterapi dengan sinar x atau gamma menimbulkan ionisasi pada jaringan. Sebagai akibat dari ionisasi ini terjadi kelainan atau kerusakan pada jaringan. Efek biologis radiasi dibagi menjadi dua yaitu, efek somatik dan efek genetik. Pembagian efek somatis maupun genetik berdasarkan atas kerusakan sel atau jaringan yang ditimbulkan oleh radiasi pengion tersebut. Efek somatis berkaitan dengan besarnya radiasi yang diabsorpsi dan respon jaringan terhadap radiasi. Respon yang berlainan ini disebut sensitivitas jaringan terhadap radiasi. Efek genetik adalah efek yang dirasakan oleh keturunan dari individu yang terkena paparan radiasi (Gabriel. 1996).

Radioterapi dengan sinar X, sinar gamma atau partikel isotop tergantung dari energi yang diabsorpsi baik secara efek fotoelektris maupun efek Kompton yang menimbulkan ionisasi pada jaringan. Di dalam sel akan terjadi 2 efek yang merusak yaitu, efek ionisasi dan efek biokimia. Pada efek ionisasi, sel-sel yang terionisasi akan memancarkan elektron pada struktur

ikatan kimia akibat terpecahnya molekul-molekul dari sel sehingga terjadi kerusakan sel. Pada efek biokimia, radiasi pengion akan menyebabkan molekul air dalam sel membentuk ion H^* dan OH^* menjadi radikal bebas dan mengakibatkan kerusakan jaringan (Gabriel, 1996).

Efek somatis berkaitan erat dengan besarnya radiasi yang diabsorpsi dan respon jaringan terhadap radiasi. Respon yang berlainan ini dinamakan sensitivitas jaringan terhadap radiasi. Susunan sensitivitas jaringan dari yang paling sensitif adalah sumsum tulang dan sistem hemopoetik, sistem reproduksi, sistem pencernaan, kulit, jaringan ikat, jaringan kelenjar, tulang, otot dan syaraf (Gabriel, 1996).

Efek somatis yang ditimbulkan oleh radiasi pengion dapat menyebabkan kelainan pada tubuh yaitu pada kulit terjadi dermatitis akut atau peradangan kulit akut. Pada mata menimbulkan konjungtivitis dan keratitis, lensa mata sangat sensitif sehingga pada penyinaran 400-500 rad menimbulkan katarak. Pada alat kelamin dosis 600 rad menimbulkan sterilitas (testis lebih sensitif daripada ovum). Pada dosis rendah dapat menimbulkan mutasi gen dan pada wanita hamil dapat terjadi kematian atau kelainan fetus. Pada paru-paru menimbulkan sesak nafas, batuk, nyeri dada serta fibrosis paru. Pada tulang dapat menimbulkan gangguan pertumbuhan tulang serta osteoporosis. Pada saraf dapat menimbulkan myelitis dan degenerasi jaringan otak. Selain itu efek radiasi juga dapat menyebabkan demam, rasa lemah, kurang nafsu makan, mual, nyeri kepala,diare. Sedangkan efek genetik dapat menyebabkan terjadinya mutasi gen pada dosis 25-150 rem (Gabriel, 1996).

2.8.3 Efek Radiasi Pada Organ Tubuh

Respon dari berbagai jaringan dan organ tubuh terhadap radiasi pengion sangat bervariasi. Selain bergantung pada sifat fisik radiasi juga bergantung pada karakteristik biologi penyusun jaringan/organ tubuh terpajan. Diketahui bahwa setiap organ tubuh paling tidak tersusun dari 3 komponen yaitu pembuluh darah, jaringan ikat atau penunjang dan jaringan parenkim. Tingkat sensitivitas dari jaringan penyusun organ berbeda-beda bergantung antara lain pada tingkat proliferasi

atau diferensiasi yang akhirnya akan mempengaruhi tingkat sensitivitas dari organ terhadap paparan radiasi.

Kerusakan sel akan mempengaruhi fungsi jaringan atau organ bila jumlah sel yang mati/rusak dalam jaringan/organ tersebut cukup banyak. Semakin banyak sel yang rusak/mati, semakin parah gangguan fungsi organ yang dapat berakhir dengan hilangnya kemampuan untuk menjalankan fungsinya dengan baik. Perubahan fungsi sel atau kematian dari sejumlah sel menghasilkan suatu efek biologi dari radiasi yang bergantung antara lain pada jenis radiasi (LET), dosis, jenis sel dan lainnya.

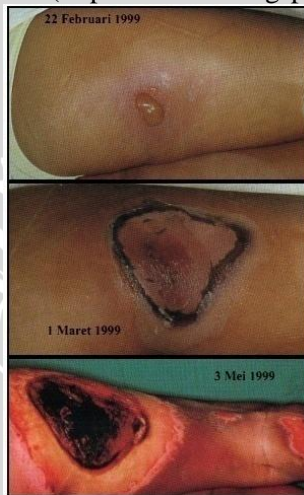
2.8.3.1 Kulit

Sel yang berperan dalam regenerasi kulit adalah sel epidermis. Sel epidermis tersusun dari lapisan sel basal yang berperan dalam proses peremajaan kulit. Sedangkan lapisan kulit yang lebih dalam di bawah epidermis dan berdekatan dengan organ adalah lapisan dermis. Folikel rambut dan kelenjar sebaceous masuk hingga ke dalam dermis. Folikel rambut dan kelenjar sebaceous termasuk bagian dari kulit yang mengalami proses regenerasi yang cepat, sementara dermis lebih lambat (Alpen, 1990).

Timbulnya efek pada kulit akibat radiasi dapat terjadi setelah beberapa minggu, sampai dua atau tiga bulan tergantung dari kemampuan regenerasi sel. Pada dosis sedang, setelah minggu pertama, kedua atau ketiga akan terjadi erythema dan terjadinya bisa lebih cepat dalam dua atau tiga hari jika dosis yang diterima lebih besar. Pada dosis radiasi tinggi, dapat terjadi deskuamasi kering dan selanjutnya deskuamasi basah pada epidermis. Selain itu juga dapat menimbulkan kerontokan pada folikel rambut dan kelenjar keringat tidak berfungsi. Efek radiasi juga dapat menyebabkan penipisan pada dermis dan pada dosis yang tinggi dapat menyebabkan nekrosis. Efek lain adalah terjadi inflamasi, fibrosis dan vaskularisasi yang tidak memadai (Alpen, 1990).



Gambar 2.14 Eritema
(<http://usumed.blogspot.com>)



Gambar 2.15 Luka bakar pada kulit akibat pajanan radiasi eksterna Ir-192 dengan aktivitas 37 Ci (1,37 TBq) pada kasus kecelakaan radiasi di PLTAYanango, Peru, pada tanggal 20 Februari 1999 (Alatas, 2004)

Efek deterministik pada kulit bervariasi dengan besarnya dosis. Paparan radiasi sekitar 2-3 Gy dapat menimbulkan efek kemerahan (eritema) sementara yang timbul dalam waktu beberapa jam dan kemudian menghilang. Beberapa minggu kemudian, eritema akan kembali muncul sebagai akibat dari hilangnya sel stem/basal pada epidermis. Dosis sekitar 3 – 8 Gy menyebabkan terjadinya kerontokan rambut (epilasi) dan pengelupasan kulit (deskuamasi kering) dalam waktu 3 – 6

minggu setelah paparan radiasi. Pada dosis yang lebih tinggi, sekitar 12 – 20 Gy, akan mengakibatkan terjadinya pengelupasan kulit disertai dengan pelepasan dan bernanah (blister) serta peradangan akibat infeksi pada lapisan dalam kulit (dermis) sekitar 4 – 6 minggu kemudian. Kematian jaringan (nekrosis) timbul dalam waktu 10 minggu setelah paparan radiasi dengan dosis lebih besar dari 20 Gy, sebagai akibat dari kerusakan yang parah pada kulit dan pembuluh darah. Bila dosis yang di terima mencapai 50 Gy, nekrosis akan terjadi dalam waktu yang lebih singkat yaitu sekitar 3 minggu (Diklat, 2005).

Efek stokastik pada kulit adalah kanker kulit. Keadaan ini, berdasarkan studi epidemiologi, banyak dijumpai pada para penambang uranium yang menderita kanker kulit di daerah muka akibat paparan radiasi dari debu uranium yang menempel pada muka. Hal yang sama juga terjadi pada pasien radioterapi yang menggunakan orthovoltage (200 – 300 kVp) atau superficial x-rays (50 - 150 kVp) (Diklat, 2005).

2.8.3.2 Mata

Dosis ambang pada mata hingga menyebabkan katarak adalah jika penyinaran pada lensa mata sekitar 200-600 rad (2-6 Gy). Dosis fraksinasi pada penyinaran terbukti efektif untuk melindungi lensa mata dari katarak. Pada dosis total yang lebih rendah, fraksinasi dapat meningkatkan batas ambang 2-3 kali lipat. Akan tetapi jika dosis total yang diberikan melebihi batas maka fraksinasi tidak berpengaruh. Jika dosis radiasi pada lensa lebih dari 11 Gy, katarak dapat terjadi tanpa memperhatikan bagaimana dosis itu diberikan, secara fraksinasi atau akut. Lamanya periode laten katarak tergantung dari dosis yang diterima. Pada dosis yang tinggi periode laten dapat terjadi kurang dari 1 tahun, namun pada dosis yang rendah bisa setelah 10 tahun gejala katarak baru tampak (Alpen,1990).

Mata terkena paparan radiasi baik akibat dari radiasi lokal (akut) maupun paparan radiasi seluruh tubuh. Lensa mata adalah struktur mata yang paling sensitif terhadap radiasi. Kerusakan pada lensa diawali dengan terbentuknya titik-titik kekeruhan atau hilangnya sifat transparansi sel serabut lensa yang mulai dapat dideteksi setelah paparan radiasi sekitar 0,5

Gy. Kerusakan ini bersifat akumulatif dan dapat berkembang sampai terjadi kebutaan akibat katarak. Tidak seperti efek deterministik pada umumnya, katarak tidak akan terjadi beberapa saat setelah paparan, tetapi setelah masa laten berkisar dari 6 bulan sampai 35 tahun, dengan rerata sekitar 3 tahun (Diklat, 2005).



Gambar 2.16 Katarak

(<https://lh3.googleusercontent.com/katarak2.jpg>)

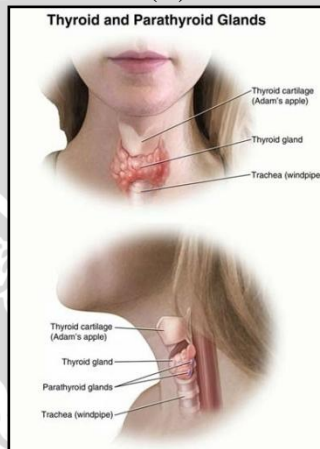
2.8.3.3 Thyroid

Thyroid atau kelenjar gondok berfungsi mengatur proses metabolisme tubuh melalui hormon tiroksin (yang dihasilkannya). Kelenjar ini beresiko mengalami kerusakan baik akibat paparan radiasi eksterna maupun radiasi interna. Tiroid tidak terlalu peka terhadap radiasi. Meskipun demikian bila terjadi inhalasi radioaktif yodium maka akan segera terakumulasi dalam kelenjar tersebut dan mengakibatkan kerusakan. Paparan radiasi dapat menyebabkan tiroiditis akut dan hipotiroidism. Dosis ambang untuk tiroiditis akut sekitar 200 Gy (Diklat, 2005).

Efek stokastik berupa kanker tiroid. Hal ini banyak terjadi sebagai akibat paparan radiasi tindakan radioterapi (sampai 5 Gy) pada kelenjar timus bayi yang menderita pembesaran kelenjar timus akibat infeksi. Paparan radiasi pada kelenjar timus yang berada tepat di bawah kelenjar thyroid ini menyebabkan kelenjar thyroid juga terirradiasi walaupun dengan dosis yang lebih rendah. Hal ini mengakibatkan individu tersebut menderita kanker thyroid setelah dewasa (Diklat, 2005).



(A)



(B)

Gambar 2.17 A) Kanker Thyroid B) Letak Kelenjar Thyroid (<http://blogspot.com/TYROID.jpg>)

Penelitian membuktikan ada hubungan yang signifikan antara pemberian dosis radiasi yang berlebihan dengan peningkatan kasus kanker thyroid pada anak dan remaja. Pada tahun 1944-1957, sekitar 740000 Ci ($2,7 \times 10^{16}$ Bq) radioaktiv ^{131}I terlepas ke atmosfer dari laboratorium Hanford. Penelitian dilakukan terhadap 3190 orang yang tinggal di daerah sekitar laboratorium Hanford dan lahir tahun 1940-1946. Ketika mereka berusia 46-57 tahun, dosis radiasi pada thyroid berkisar antara 0,0008 mGy-2842 mGy. Sementara itu sebuah studi epidemiologi pada orang yang menerima dosis radiasi pada thyroid sebanyak 0,5 Gy dari penyinaran diagnostik

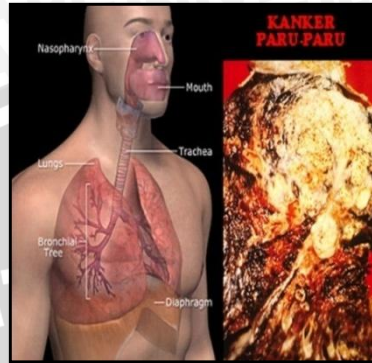
menggunakan radioaktif Iodine tidak menunjukkan adanya peningkatan resiko kanker thyroid (Cember & Johnson, 2009).

2.8.3.4 Paru

Paru adalah organ yang memiliki vaskularisasi tinggi karena fungsinya sebagai pertukaran gas dan cairan dari tubuh ke lingkungan. Salah satu efek radiasi pada paru adalah menimbulkan pneumonitis. Pneumonitis ini terjadi karena perubahan karakteristik pada permukaan alveolar sehingga menimbulkan perubahan pada pertukaran gas dan cairan. Sel alveolar berperan dalam menjalankan fungsi paru. Radiasi dapat mengurangi jumlah dari sel alveolar sehingga menimbulkan pneumonitis. Setelah pulih dari pneumonitis, kemungkinan dapat timbul sindrom yang lain pada paru, diantaranya adalah fibrosis, inflamasi, sklerosis dan kehilangan elastisitas (Alpen, 1990).

Paru dapat terkena paparan radiasi eksterna dan interna. Efek deterministik berupa pneumonitis biasanya mulai timbul setelah beberapa minggu atau bulan. Efek utama adalah pneumonitis interstitial yang dapat diikuti dengan terjadinya fibrosis sebagai akibat dari rusaknya sel sistem vaskularisasi kapiler dan jaringan ikat yang dapat berakhir dengan kematian. Kerusakan sel yang mengakibatkan terjadinya peradangan akut paru ini biasanya terjadi pada dosis 5 – 15 Gy. Perkembangan tingkat kerusakan sangat bergantung pada volume paru yang terkena radiasi dan laju dosis. Hal ini juga dapat terjadi setelah inhalasi partikel radioaktif dengan aktivitas tinggi dan waktu paro pendek. Setelah inhalasi, distribusi dosis dapat terjadi dalam periode waktu yang lebih singkat atau lebih lama, antara lain bergantung pada ukuran partikel dan bentuk kimiawinya (Diklat, 2005).

Efek stokastik berupa kanker paru. Keadaan ini banyak dijumpai pada para penambang uranium. Selama melakukan aktivitasnya, para pekerja menginhaleasi gas Radon-222 sebagai hasil luruh dari uranium (Diklat, 2005).



Gambar 2.18 Kanker paru-paru

(<http://1.bp.blogspot.com/kanker+paru-paru.jpg>)

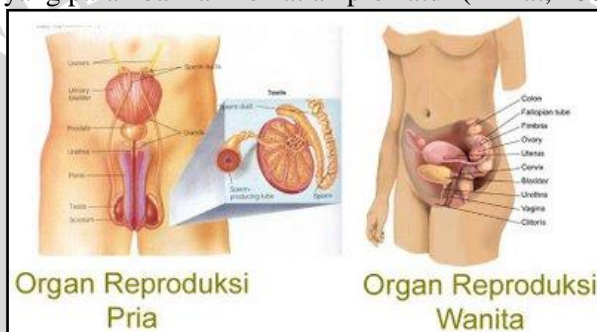
2.8.3.5 Organ Reproduksi

Efek deterministik pada organ reproduksi atau gonad adalah sterilitas atau kemandulan. Paparan radiasi pada testis akan mengganggu proses pembentukan sel sperma yang akhirnya akan mempengaruhi jumlah sel sperma yang akan dihasilkan. Proses pembentukan sel sperma diawali dengan pembelahan sel stem/induk dalam testis. Sel stem akan membelah dan berdiferensiasi sambil bermigrasi sehingga sel yang terbentuk siap untuk dikeluarkan. Dengan demikian terdapat sejumlah sel sperma dengan tingkat kematangan yang berbeda, yang berarti mempunyai tingkat radiosensitivitas yang berbeda pula. Dosis radiasi 0,15 Gy merupakan dosis ambang sterilitas sementara karena sudah mengakibatkan terjadinya penurunan jumlah sel sperma selama beberapa minggu. Dosis radiasi sampai 1 Gy menyebabkan kemandulan selama beberapa bulan dan dosis 1 – 3 Gy kondisi steril berlangsung selama 1 – 2 tahun. Menurut ICRP 60, dosis ambang sterilitas permanen adalah 3,5 – 6 Gy (Diklat, 2005).

Pengaruh radiasi pada sel telur sangat bergantung pada usia. Semakin tua usia, semakin sensitif terhadap radiasi. Selain sterilitas, radiasi dapat menyebabkan menopause dini sebagai akibat dari gangguan hormonal sistem reproduksi. Dosis terendah yang diketahui dapat menyebabkan sterilitas sementara adalah 0,65 Gy. Dosis ambang sterilitas menurut ICRP 60 adalah 2,5 – 6 Gy. Pada usia yang lebih muda (20-an), sterilitas

permanen terjadi pada dosis yang lebih tinggi yaitu 12 – 15 Gy, tetapi pada usia 40-an dibutuhkan dosis 5 – 7 Gy (Diklat, 2005).

Efek stokastik pada sel germinal lebih dikenal dengan efek pewarisan yang terjadi karena mutasi pada gen atau kromosom sel pembawa keturunan (sel sperma dan sel telur). Perubahan kode genetik yang terjadi akibat paparan radiasi akan diwariskan pada keturunan individu terpajan. Penelitian pada hewan dan tumbuhan menunjukkan bahwa efek yang terjadi bervariasi dari ringan hingga kehilangan fungsi atau kelainan anatomik yang parah bahkan kematian prematur (Diklat, 2005).



Gambar 2.19 Sistem reproduksi

(<http://3.bp.blogspot.com/sistem+reproduksi.jpg>)

Gonad termasuk organ radiosensitif. Dosis radiasi 300 mGy pada testis dapat menyebabkan sterilitas sementara, sedangkan untuk wanita 3 Gy pada ovarium. Pada laki-laki dosis sekitar 4,4 Gy dapat menyebabkan kemandulan selama beberapa tahun. Sterilitas sementara pada wanita dapat dilihat dari berhentinya menstruasi selama beberapa periode, 1 bulan atau lebih, tergantung dosis yang diterima. Ketidakteraturan siklus menstruasi merupakan indikasi adanya perubahan fungsi pada gonad, akibat radiasi lokal pada ovarium dengan dosis lebih rendah dari dosis radiasi yang dapat menyebabkan sterilitas sementara (Cember & Johnson, 2009).

2.8.3.6 Sistem Pembentukan Darah

Sumsum tulang sebagai tempat pembentukan sel darah jika mendapat paparan radiasi dosis tinggi akan mengakibatkan kematian dalam waktu beberapa minggu. Hal ini disebabkan

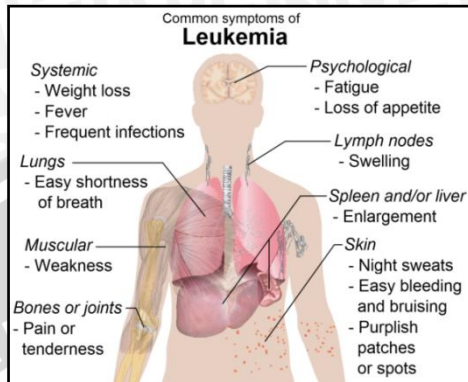
karena terjadinya penurunan secara tajam sel stem/induk pada sumsum tulang. Dosis radiasi seluruh tubuh sekitar 0,5 Gy sudah dapat menyebabkan penurunan proses pembentukan sel-sel darah sehingga jumlah sel darah akan menurun (Diklat, 2005).

Komponen sel darah terdiri dari sel darah merah (eritrosit), sel darah putih(lekosit) dan sel keping darah (trombosit). Sel leukosit dapat dibedakan atas sel limfosit dan netrofil. Radiosensitivitas dari berbagai jenis sel darah ini bervariasi, sel yang paling sensitif adalah sel limfosit dan sel yang paling resisten adalah sel eritrosit.

Jumlah sel limfosit menurun dalam waktu beberapa jam pasca paparan radiasi, sedangkan jumlah granulosit dan trombosit juga menurun tetapi dalam waktu yang lebih lama, beberapa hari atau minggu. Sementara penurunan jumlah eritrosit terjadi lebih lambat, beberapa minggu kemudian. Penurunan jumlah sel limfosit absolut/total dapat digunakan untuk memperkirakan tingkat keparahan yang mungkin diderita seseorang akibat paparan radiasi akut.

Pada dosis yang lebih tinggi, individu terpapar umumnya mengalami kematian sebagai akibat dari infeksi karena terjadinya penurunan jumlah sel leukosit (limfosit dan granulosit) atau dari pendarahan yang tidak dapat dihentikan karena menurunnya jumlah trombosit dalam darah.

Efek stokastik pada sumsum tulang adalah leukemia dan kanker sel darah merah. Berdasarkan pengamatan pada para korban bom atom di Hiroshima dan Nagasaki, leukemia merupakan efek stokastik tertunda pertama yang terjadi setelah paparan radiasi seluruh tubuh dengan masa laten sekitar 2 tahun dan puncaknya setelah 6 – 7 tahun (Cember & Johnson, 2009).



Gambar 2.20 Leukimia

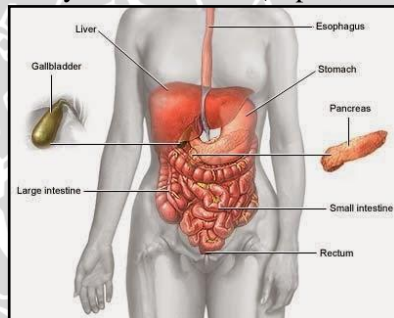
(http://upload.wikimedia.org/Symptoms_of_leukemia.png)

Menurut dokter radiologi asal Amerika, dosis radiasi sebesar 1 Gy/tahun dapat meningkatkan resiko leukimia. Pada peristiwa bom nuklir Hiroshima dan Nagasaki, ada peningkatan kasus kematian akibat leukimia pada dosis radiasi 0,4 Gy atau lebih, tetapi tidak ada peningkatan pada dosis kurang dari 0,4 Gy. Sedangkan dosis dosis sebesar 5-50 mGy pada fetus dapat menjadi pencetus terjadinya leukimia (Cember & Johnson, 2009).

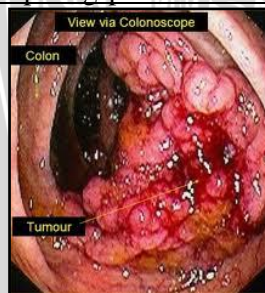
2.8.3.7 Sistem Pencernaan

Bagian dari sistem ini yang paling sensitif terhadap radiasi adalah usus halus. Kerusakan pada saluran pencernaan makanan memberikan gejala mual, muntah, diare, gangguan sistem pencernaan dan penyerapan makanan. Menurut National Research Council Staff (1996), dosis radiasi 4-5 Gy dapat menimbulkan efek pada sistem pencernaan, terutama pada usus halus dan lambung bagian bawah. Pada dosis di bawah 4 Gy akan timbul gejala awal berupa mual yang terjadi beberapa jam setelah penyinaran. Gejala ini akan mereda dalam 1 sampai 2 hari. Dosis radiasi yang tinggi dapat mengakibatkan kematian karena dehidrasi akibat muntah dan diare yang parah. Efek stokastik yang timbul berupa kanker pada epitel saluran pencernaan (Diklat, 2005).

Sistem pencernaan terdiri atas esofagus, lambung, usus halus, usus besar dan rektum. Esofagus merupakan jalan masuknya makan dari mulut ke lambung. Esofagus berbentuk tubular dengan dilapisi otot dan jaringan konektiv. Pada esofagus terjadi kontraksi dengan adanya otot pada tubular. Jaringan ephitalium pada esofagus adalah bagian yang sensitif terhadap radiasi. Radiasi pada esofagus dapat menimbulkan efek akut berupa ulcer esofagus yang muncul dalam waktu 2-4 minggu. Setelah penyinaran pada dosis 24 Gy dapat menimbulkan esophagitis. Efek yang mungkin timbul setelah beberapa bulan setelah penyinaran adalah penyempitan esofagus (stenosis), penurunan fungsi pada lapisan epitel sehingga menyebabkan lemahnya fungsi otot dan jaringan konektiv serata menurunnya vaskularisasi (Alpen, 1990).



Gambar 2.21 Sistem pencernaan
(<http://2.bp.blogspot.com/kanker-usus.jpg>)

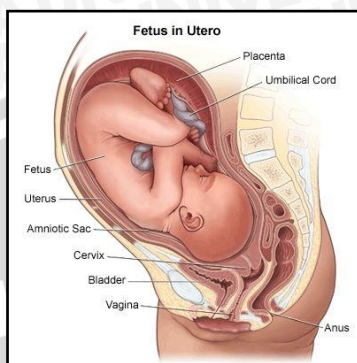


Gambar 2.22 Kanker usus
(<http://www.content/uploads/gambar-gejala-kanker-usus.jpg>)

2.8.3.8 Janin

Efek paparan radiasi pada janin dalam kandungan sangat bergantung pada kehamilan pada saat terpapar radiasi. Dosis ambang yang dapat menimbulkan efek pada janin adalah 0,05 Gy. Perkembangan janin dalam kandungan dapat dibagi atas 3 tahap. Tahap pertama yaitu preimplantasi dan implantasi yang dimulai dari proses pembuahan sampai menempelnya zigot pada dinding rahim yang terjadi pada umur kehamilan 1-2 minggu. Selama fase ini, sel janin tumbuh dengan cepat dan belum terdiferensiasi. Menurut hukum Bergonie-Tribondeau, sel pada fase ini sangat sensitif. Pengaruh radiasi pada tahap ini dapat menyebabkan kematian janin. Tahap kedua adalah organogenesis pada masa kehamilan 3 – 7 minggu. Pada fase ini jaringan embrio berdiferensiasi menjadi beberapa organ penting. Dosis radiasi $\geq 0,15$ Gy pada embrio dapat menyebabkan kematian pada embrio atau cacat lahir. Tahap ketiga adalah tahap fetus pada usia kehamilan 8 minggu sampai kelahiran, pada fase ini pertumbuhan fetus sangat cepat. Pengaruh radiasi berupa retardasi mental pada dosis $\geq 0,25$ Gy. Penelitian membuktikan paparan radiasi pada usia kehamilan 8-17 minggu dapat meningkatkan retardasi mental karena pada fase ini, jumlah neuron pada otak meningkat dengan cepat. Janin juga berisiko terhadap efek stokastik dan yang paling besar adalah risiko terjadinya leukemia pada masa anak-anak (Cember & Johnson, 2009).

Kemunduran mental diduga terjadi karena salah sambung sel-sel syaraf di otak yang menyebabkan penurunan nilai IQ. Dosis ambang diperkirakan sekitar 0,1 Gy untuk usia kehamilan 8 - 15 minggu dan sekitar 0,4 - 0,6 Gy untuk usia kehamilan 16 - 25 minggu. Pekerja wanita yang hamil tetap dapat bekerja selama dosis radiasi yang mungkin diterimanya selalu dikontrol secara ketat. Komisi merekomendasikan pembatasan dosis radiasi yang diterima permukaan perut wanita hamil tidak lebih dari 1 mSv.



Gambar 2.23 Janin

(<https://lh4.googleusercontent.com/em0259.jpg>)

2.3.9 Sindrom Radiasi Akut

Sindrom radiasi akut adalah paparan radiasi pada seluruh tubuh yang akan menimbulkan efek pada organ dan sistem organ. Efek ini tergantung pada sensitivitas organ dan dosis yang diterima. Sindrom radiasi akut dibagi menjadi 3, yaitu sindrom radiasi akut pada sistem pembentukan darah, sistem pencernaan serta sistem syaraf dan otak. Efek umum yang mungkin timbul pada sindrom radiasi akut adalah mual, muntah, lemas, lelah dan peningkatan suhu tubuh (Cember & Johnson, 2009).

Sindrom akut pada sistem pembentukan darah akan menimbulkan efek pada pembentukan sel darah. Perubahan jumlah sel darah terjadi pada pemberian dosis radiasi sinar gamma pada seluruh tubuh sebesar 14 mGy. Kebanyakan kasus perubahan jumlah sel darah terjadi pada pemberian dosis antara 250-500 mGy. Perubahan signifikan terjadi pada dosis >500 mGy. Sindrom ini mengakibatkan terjadinya penurunan jumlah sumsum tulang yang berperan dalam pembentukan sel darah. Jumlah sumsum tulang akan menurun pada dosis 2 Gy dan akan menurun sangat tajam pada dosis 4-6 Gy. Sumsusm tulang dapat meregenerasi diri jika kondisi kesehatan penderita baik, namun pada dosis 7 Gy atau lebih akan menyebabkan kerusakan permanen. Timbulnya sindrom ini ditandai dengan mual, muntah, lelah dan lemas setelah beberapa jam terpapar radiasi. Selain itu terjadi kerontokan rambut dalam waktu 2-3

minggu setelah terpapar radiasi dan dapat menyebabkan kematian setelah 1-2 bulan jika pertolongan medis tidak berhasil (Cember & Johnson, 2009).

Sindrom pencernaan terjadi pada dosis sekitar 10 Gy atau lebih dan menyebabkan kerusakan pada sel epitel usus dan sumsum tulang. Pada sindrom ini akan terjadi gejala awal seperti mual, muntah dan diare. Kematian dapat terjadi beberapa minggu setelah terpapar radiasi. Sindrom syaraf dan otak terjadi pada dosis sekitar 20 Gy. Sindrom ini dapat merusak sistem syaraf dan sistem organ lain pada tubuh. Penderita akan pingsan dalam waktu beberapa menit setelah terpapar radiasi dan meninggal setelah beberapa jam atau beberapa hari. Kecepatan waktu penderita pingsan tergantung dosis radiasi yang diterima. Pada dosis sekitar 44 Gy, penderita akan bingung dalam waktu 30 detik. Kemudian setelah 10 menit akan pingsan dan mengalami shock. Setelah itu dalam waktu 35 menit akan mengalami diare (Cember & Johnson, 2009).

2.9 Kanker

Kanker atau neoplasma ganas adalah penyakit yang ditandai dengan kelainan siklus sel yang menimbulkan kemampuan sel untuk tumbuh tidak terkendali (pembelahan sel melebihi batas normal), menyerang jaringan biologis di sekitarnya, maupun bermigrasi ke jaringan tubuh lain melalui sirkulasi darah (metastasis). Ketiga karakter ganas inilah yang membedakan antara kanker dengan tumor. Pertumbuhan sel tidak terkendali ini disebabkan kerusakan Deoxyribo Nucleic Acid (DNA), yang menyebabkan mutasi pada gen vital yang mengontrol pembelahan sel. Beberapa mutasi dibutuhkan untuk mengubah sel normal menjadi sel kanker. Dengan berkembangnya ilmu kedokteran yang ditunjang dengan ilmu-ilmu yang lain, maka penyakit kronis seperti kanker dapat disembuhkan dengan bantuan pesawat radioterapi. Pesawat ini membangkitkan radiasi berenergi tinggi berupa elektron dan atau foton yang dapat membunuh sel-sel kanker melalui pemberian dosis radiasi yang terukur dengan memperkecil efek radiasi pada jaringan yang sehat di sekitar kanker (Waryono & Triyani, 2011).

Kanker terjadi pertama kali pada tingkatan sel. Pada sel terjadi kerusakan molekul DNA disebabkan oleh radiasi pengion atau interaksi dengan zat kimia. Jika sel tidak mampu melakukan regenerasi maka kerusakan DNA ini akan menyebabkan keganasan pada sel dan menimbulkan kanker. Beberapa organ dan jaringan tubuh diketahui lebih sensitif terkena kanker daripada organ tubuh yang lain, yaitu sistem pembentukan darah, thyroid, tulang dan kulit. Terjadinya kanker membutuhkan waktu lama, antara 5-20 tahun setelah paparan radiasi (Cember & Johnson, 2009).

Sistem TNM merupakan sistem standar dalam menentukan stadium kanker. Pada sistem TNM, kanker ditandai dengan kategori T, N, dan M.

Tabel 2.3 Sistem Penentuan Stadium TNM (Sabiston, 1995)

Tumor	
Tx	Tumor tidak dapat dinilai
T0	Tanpa bukti tumor primer
TIS	Karsinoma in situ (kanker belum menyebar ke jaringan sekitarnya)
T1, T2, T3, T4	Peningkatan progresif ukuran tumor dan invansi ke jaringan sekitarnya
Nodus	
Nx	Nodus limfatik regional tidak dapat dinilai secara klinik
N0	Nodus limfatik regional tidak mengandung kanker
N1, N2, N3, N4	Peningkatan derajat keterlibatab nodus limfatik regional
Metastasis	
Mx	Tidak dapat ditentukan
M0	Tidak ada bukti terdapat metastasis
M1	Ada metastasis jauh

Singkatan : T= Tumor primer, N = Nodus limfatik regional, M = Metastasis jauh

Komite BEIR VII mencatat EER (*Excess relative Risk*) pada beberapa kasus kanker dan leukimia per 1 Sv (100 rem) pada radiasi seluruh tubuh (*whole body radiation*). EER adalah

angka yang menunjukkan perkembangan kanker akibat paparan radiasi pengion dan tergantung pada beberapa faktor, diantaranya umur, jenis kelamin, dan riwayat dosis. Nilai EER didefinisikan sebagai berikut (Cember & Johnson, 2009) :

EER =

$$\frac{\text{Kasus kanker pada kelompok yang terkena paparan radiasi}}{\text{Kasus kanker pada kelompok yang tidak terkena paparan radiasi}}$$

(2.24)

Tabel 2.4 Jumlah kejadian kanker dan dosis radiasi pada 86.572 korban bom atom (Cember & Johnson, 2009)

Jenis Kanker	Jumlah Kasus	Excess relative Risk (per Sv)	
		Laki-laki	Wanita
Lambung	3602	0,21	0,48
Colon	1165	0,63	0,43
Hepar	1146	0,32	0,32
Paru-paru	1136	0,32	1,40
Payudara	952	-	0,51
Prostat	281	0,12	-
Uterus	875	-	0,055
Ovarium	190	-	0,38
Bladder	352	0,50	1,65
Thyroid	243	0,53	1,05
Leukimia	296	1,1	1,2
Kanker lain	2969	0,27	0,45

Fakta dari studi epidemik radiasi membuktikan bahwa paparan radiasi dapat meningkatkan kebolehjadiannya kanker. Diasumsikan bahwa resiko kanker bervariasi secara linear dengan dosis bahwa terdapat suatu kepastian akan resiko bahkan pada dosis yang sangat rendah. Dosis radiasi, sekecil apapun, diasumsikan memiliki resiko terhadap kesehatan individu terpapar. Dengan meningkatnya dosis, keparahan kanker itu sendiri tidak meningkat tetapi probabilitas akan resiko terbentuknya kanker yang meningkat (Waryono & Triyani, 2011).

Menurut Waryono dan Triyani (2011), sangat sulit untuk membuat suatu kajian resiko kanker sepanjang hidup seseorang sebagai fungsi dosis. Hubungan antara dosis radiasi dengan kemungkinan timbulnya efek stokastik dapat diekspresikan sebagai faktor resiko, yaitu probabilitas terjadinya sebuah efek stokastik per sievert radiasi. Dengan demikian kemungkinan, Kebolehjadian suatu efek stokastik = Dosis (Sv) x Faktor resiko (Sv^{-1}).

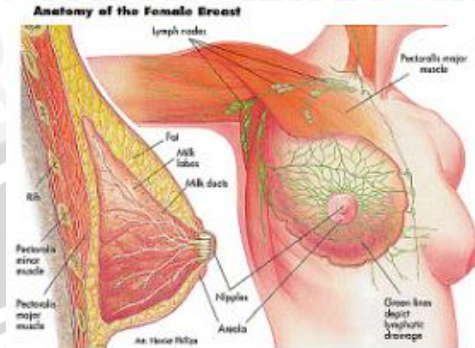
Resiko relatif waktu hidup kanker yang mematkan dari dosis standar radiasi pengion ditunjukkan pada tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5 Faktor resiko kanker (Underwood, 1994):

Jaringan	Faktor Resiko (Sv^{-1})
Paru	1 dalam 80
Payudara (wanita)	1 dalam 90
Jaringan hemopoetik	1 dalam 360
Tulang	1 dalam 2000
Thyroid	1 dalam 4000
Organ lain (total)	1 dalam 43
	Total untuk tubuh = 1 dalam 20

2.9.1 Kanker Payudara (Ca Mammae)

Kanker payudara adalah tumor ganas yang menyerang jaringan payudara. Jumlah penderita di dunia terus mengalami peningkatan. Penelitian pada tahun 1993 menyebutkan, jumlah kanker payudara pada tahun 1985 mencapai 720.000 orang, terdiri dari 422.000 di negara maju dan 298.000 di negara berkembang. Di Indonesia, kanker payudara merupakan kanker kedua paling banyak yang diderita kaum wanita setelah kanker cervix (Purwoastuti, 2008).



Gambar 2.24 Anatomi payudara (<http://www.smart-pustaka.com/anatomi-payudara>)

Sampai saat ini belum diketahui penyebab utama munculnya kanker payudara. Namun ada beberapa faktor resiko yang erat kaitannya dengan terjadinya kanker payudara, yaitu umur, riwayat perkawinan, usia menarche dini, menopause terlambat, riwayat keluarga dan konsumsi makanan tinggi lemak, alkohol dan rokok. Resiko kanker payudara meningkat seiring dengan bertambahnya umur. Kanker payudara umumnya menyerang wanita yang telah berusia lebih dari 40 tahun. Namun, wanita muda pun juga bisa terserang kanker ini. Wanita yang tidak menikah dan tidak mempunyai anak memiliki resiko menderita penyakit kanker payudara 2-4 kali lebih tinggi daripada wanita yang menikah dan menyusui. Wanita yang memiliki anggota keluarga penderita kanker payudara beresiko 2-3 kali lebih tinggi daripada wanita yang tidak memiliki anggota keluarga penderita kanker payudara (Purwoastuti, 2008).

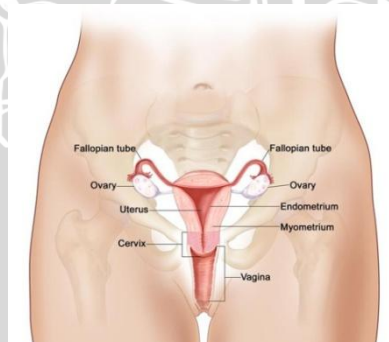
Kanker payudara pada tahap dini biasanya tidak menimbulkan keluhan. Penderita merasa sehat, tidak merasa nyeri, dan tidak terganggu aktivitasnya. Gejala yang mungkin dirasakan pada stadium dini adalah benjolan kecil di payudara. Keluhan baru muncul bila penyakitnya sudah lanjut. Beberapa keluhannya yaitu timbul rasa sakit atau nyeri pada payudara, semakin lama benjolan yang tumbuh semakin besar, payudara mengalami perubahan bentuk dan ukuran karena mulai timbul pembengkakan, luka pada payudara dan puting susu, keluar darah, nanah, atau cairan encer dari puting atau

keluar air susu pada wanita yang tidak sedang hamil atau tidak sedang menyusui (Purwoastuti, 2008).

2.9.2 Kanker Cervix (Ca Cervix)

Kanker Cervix merupakan salah satu penyebab utama kematian wanita yang berhubungan dengan kanker. Di seluruh dunia, diperkirakan insiden kanker cervix sekitar 500.000 kasus dan 250.000 kematian setiap tahun, 80% kematian terjadi di negara berkembang. Di Indonesia, diperkirakan terjadi 40.000 kasus kanker cervix per tahun. Menurut Notodiharjo (2002), kanker serviks merupakan kanker yang terjadi pada serviks atau leher rahim, suatu daerah pada organ reproduksi wanita yang merupakan pintu masuk ke arah rahim, letaknya antara rahim (uterus) dan liang senggama atau vagina (Rini, 2009).

Penentuan stadium kanker serviks dilakukan secara klinis. Data yang diperoleh dari pemeriksaan klinis, pemeriksaan radiologi (paru, tulang, ginjal, kolon sigmoid, dan rektum) dan evaluasi patologis dari biopsi untuk menentukan perkembangan penyakit dan rencana terapinya. Kanker cervix merupakan tumor yang tumbuh secara lambat yang menginvasi langsung jaringan yang berdekatan dengan uterus, vagina, rektum, kandung kemih, dan jaringan parametrium. Invasi limfatik juga terjadi baik regional maupun yang lebih jauh (Otto, 2005).



Gambar 2.25 Cervix (<http://www.cea1.com/female-anatomy/anatomy-of-cervix>)

Menurut Sarwono (2006), penentuan stadium kanker cervix dilakukan untuk mempermudah perencanaan terapi yang efektif dan optimal bagi pasien dan memperkirakan prognosis

pasien. Pada stadium II B, III, dan IV tidak dibenarkan melakukan tindakan bedah, untuk pengobatan primer adalah radioterapi. Menurut National Cancer Institute (2008), penanganan standart untuk stadium II B sampai IV A adalah radiasi dan kemoterapi. Pada stadium IV B, radiasi hanya bersifat paliatif (Rini, 2009).

Faktor penyebab utama kanker serviks adalah infeksi human papillomavirus (HPV) yang ditularkan melalui hubungan seksual. Faktor yang memperbesar resiko terjadinya kanker cervix yaitu, usia pertama kali melakukan hubungan seksual di bawah 20 tahun, wanita yang sering berganti-ganti pasangan, dan merokok. Wanita yang berusia di atas 35 tahun juga lebih beresiko terkena kanker cervix karena semakin tua usia seseorang maka semakin lama waktu pemaparan terhadap karsinogen dan sistem kekebalan tubuhnya semakin melemah (Yatim, 2005).

2.10 Sistem Hemopoetik

Darah merupakan bagian penting dalam sistem sirkulasi tubuh. Darah memiliki rasa dan bau yang khas, serta pH 7,4 (7,35-7,45). Warna darah bervariasi dari merah terang sampai merah tua kebiruan, bergantung pada kadar oksigen yang dibawa sel darah merah. Selama perkembangan embrio, pembentukan darah (hematopoesis) berlangsung dalam kantong kuning telur dan berlanjut di hati, limpa, nodus limfe dan seluruh sumsum tulang janin yang sedang berkembang. Setelah lahir dan masa kanak-kanak, sel darah terbentuk dalam semua sumsum tulang. Pada orang dewasa, sel darah hanya terbentuk pada sumsum tulang merah yang ditemukan dalam tulang sternum, iga, vertebra dan pelvis (Slonane, 2003).

Sel darah terdiri dari sel darah merah (eritrosit), sel darah putih (leukosit) dan keping darah (trombosit). Sel darah merah merupakan sel darah yang paling banyak jumlahnya. Setiap milimeter kubik darah manusia mengandung 5-6 juta sel darah merah dan terdapat sekitar 25 triliun eritrosit dalam keseluruhan 5 liter darah dalam tubuh. Eritrosit berukuran sangat kecil dan mengandung sekitar 250 juta molekul

hemoglobin, sejenis protein pengikat dan pembawa oksigen (Campbell, dkk, 2004).

Sel darah putih berfungsi dalam pertahanan tubuh. Sel darah putih terdiri atas lima jenis, yaitu monosit, neutrofil, basofil, eosinofil dan limfosit. Fungsinya secara kolektif adalah untuk melawan dan memerangi infeksi dengan berbagai cara. Monosit dan neutrofil adalah fagosit yang menelan dan mencerna bakteri dan serpihan sel-sel mati dari tubuh kita sendiri. Limfosit akan terspesialisasi menjadi sel T dan sel B, yang menghasilkan respon kekebalan melawan zat-zat asing. Secara normal, satu milimeter kubik darah manusia mempunyai sekitar 5.000-10.000 leukosit. Jumlah sel ini akan meningkat untuk sementara waktu ketika tubuh sedang terkena suatu infeksi (Campbell, dkk, 2004).

Unsur seluler darah ketiga adalah keping darah (trombosit). Trombosit adalah fragmen-fragmen sel dengan diameter sekitar 2-3 μm . Trombosit tidak mempunyai nukleus dan berfungsi dalam proses penggumpalan darah. Bahan perekat yang selalu ada dalam darah dan dalam bentuk inaktif disebut fibrinogen. Ketika terjadi luka atau pendarahan dalam tubuh, fibrinogen akan diaktifkan dan membentuk fibrin. Fibrin akan mengumpul menjadi benang-benang yang membentuk anyaman dan menutup aliran darah yang melewati pembuluh darah yang rusak (Campbell, dkk, 2004).

2.11 Proteksi Radiasi

Proteksi radiasi adalah salah satu cabang ilmu atau tehnik yang mempelajari masalah kesehatan lingkungan, yang berkaitan dengan upaya perlindungan kepada seseorang atau sekelompok orang terhadap kemungkinan terjadinya akibat negatif yang merugikan dari penggunaan radiasi. Tujuan proteksi radiasi adalah menekan dosis radiasi yang harus diterima oleh seorang pekerja radiasi menjadi serendah mungkin dan menghindari dosis yang berlebihan, yang harus diterima penderita karena cara kerja yang ceroboh.

Ada 3 filosofi proteksi radiasi yang telah direkomendasikan oleh *International Commission Radiological Protection* (ICRP) untuk dipatuhi, yaitu justifikasi, limitasi dan optimasi. Justifikasi adalah suatu kegiatan yang mencakup

paparan radiasi hanya disetujui jika kegiatan itu akan menghasilkan manfaat yang lebih besar bagi individu atau masyarakat dibandingkan dengan resiko yang diperoleh. Optimasi adalah penerimaan dosis radiasi yang serendah-rendahnya (*ALARA = As Low As Reasonably Achievable*) dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial. Limitasi adalah dosis radiasi yang diterima pekerja radiais atau masyarakat tidak melebihi Nilai Batas Dosis (NBD) radiasi yang telah ditetapkan.

Pengendalian bahaya radiasi ada 3, yaitu faktor jarak, waktu dan pelindung. Faktor jarak artinya, semakin besar jarak antara sumber radiasi dengan pekerja, maka semakin kecil paparan radiasi yang akan diterima. Faktor jarak ini dapat dinyatakan dengan rumus :

$$D_1 \times r_1^2 = D_2 \times r_2^2 \quad (2.25)$$

dimana D_1 = Laju dosis pada jarak r_1 dari sumber

D_2 = Laju dosis pada jarak r_2 dari sumber

Faktor waktu menyatakan semakin lama waktu bekerja dengan radiasi maka akan semakin besar dosis radiasi yang diterima. Hubungan laju dosis dengan waktu adalah :

$$D_t = D_0 \times t \quad (2.26)$$

dengan D_t adalah dosis total, D_0 adalah laju dosis dan t adalah waktu.

Faktor pelindung yaitu menggunakan perisai yang diletakkan diantara sumber radiasi dengan pekerja sehingga tingkat radiasi dapat ditekan serendah mungkin dengan mengatur tebal dan jenis penahan yang tepat untuk suatu jenis radiasi tertentu. Laju dosis sinar radiasi setelah melewati bahan penyerap ditulis sebagai berikut :

$$D_1 = D_0 E^{-\mu t} \quad (2.27)$$

dengan D_0 = laju tanpa penahan

μ = koefisien absorpsi linier dari penahan radiasi

t = tebal penahan

Dalam hal ini dikenal 2 jenis perisai yaitu HVL (*Half Value Layer*) dan TVL (*Tenth Value Layer*). HVL adalah tebal bahan yang dapat menyerap intensitas radiasi menjadi setengahnya, sedangkan TVL adalah tebal bahan yang dapat menyerap radiasi menjadi sepersepuluhnya.

Proteksi radiasi adalah suatu tindakan atau perlindungan yang dilakukan untuk menghindari efek-efek radiasi yang merugikan tubuh manusia. Dalam menerima radiasi ada batas-batas tertentu yang masih dapat ditolelir oleh berbagai jaringan. Misalnya tangan dan kaki boleh menerima lebih banyak radiasi dibandingkan dengan organ gonad dan lensa mata yang sangat sensitif terhadap radiasi. Salah satu usaha yang dilakukan oleh *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* untuk menghindari bahaya radiasi maka ditentukan suatu dosis maksimum yang diperkenankan sebagai pedoman dalam proteksi radiasi yaitu Nilai Batas Dosis (NBD). Dosis maksimum yang diperkenankan bagi pekerja radiasi berbeda dengan masyarakat umum. NBD untuk masyarakat adalah 1/10 dari NBD bagi pekerja radiasi (Gabriel, 1996).

Indonesia mengacu NBD berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN No.3 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Radioterapi sebagai berikut:

1. Pekerja radiasi
 - a. 20 mSv/tahun secara rata-rata selama 5 tahun
 - b. Penerimaan maksimum 50 mSv/tahun dengan memperhitungkan penerimaan dosis di tahun berikutnya
 - c. Untuk lensa mata 20 mSv/tahun secara rata-rata selama 5 tahun berturut-turut dan 50 mSv dalam 1 tahun tertentu
 - d. Untuk tangan, kaki, kulit 500 mSv/tahun
2. Masyarakat
 - a. 1 mSv dalam 1 tahun
 - b. 15 mSv/tahun untuk lensa mata
 - c. 50 mSv/tahun untuk kaki, tangan, kulit

Proteksi radiasi bagi orang-orang yang berhubungan langsung dengan sumber pengion dibagi dalam 3 golongan yaitu proteksi radiasi terhadap penderita dengan terapi radiasi, terhadap pekerja diagnostik radiologi dan terhadap kedokteran nuklir. Proteksi radiasi terhadap penderita dengan terapi radiasi dilakukan dengan memberikan perlindungan sebaik-baiknya terhadap jaringan sehat di sekitar lapangan penyinaran. Pada penyinaran sekitar mata maka mata harus mendapat

perlindungan dengan menggunakan timah hitam “lead eye shield” agar lensa mata terhindar dari kerusakan. Pada penyinaran tumor yang tidak ganas dan anak-anak perlu hati-hati dengan jumlah dosis yang diberikan karena radiasi bersifat karsinogen atau unsur penyebab kanker (Gabriel, 1996).

Proteksi radiasi terhadap pekerjadiagnostik radiologi dengan membuat radiasi dari tabung sinar X sekecil mungkin tanpa mengganggu informasi medis yang diperlukan. Hal-hal yang perlu diperhatikan adalah filter, kolimator, kualitas film dan distribusi hasil penyinaran. Filter sangat berguna untuk mengurangi intensitas sinar X yang dihasilkan tabung sinar X. Kolimator merupakan suatu celah yang berfungsi mengatur luas atau area dari berkas sinar X yang diperlukan. Kualitas film mempunyai kaitan dengan proteksi radiasi. Apabila menggunakan film yang kurang sensitif akan diperoleh gambaran yang kurang jelas. Untuk memperoleh gambaran yang jelas diperlukan dosis radiasi yang lebih besar, sehingga kemungkinan menimbulkan radiasi juga semakin besar. Distribusi hasil penyinaran dapat diperoleh dengan mengukur total radiasi pada penderita. Selain itu setiap pekerja harus berdiri di belakang tabir Pb dari arah sinar X, memakai lead apron dan film badge (Gabriel, 1996).

Proteksi radiasi terhadap kedokteran nuklir yaitu dokter dan pekerja radiasi harus mengetahui penggunaan zat radiofarmaka secara tepat, penderita yang layak mendapat terapi radioisotop, memberikan obat radioaktif kepada penderita yang benar-benar memerlukan dan memastikan bahwa instrumen deteksi bekerja secara baik dan benar (Gabriel, 1996).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian deskriptif dengan teknik pengumpulan data berupa observasi atau pengamatan langsung di lapangan. Dimana penelitian berusaha untuk menuturkan pemecahan masalah yang ada sekarang berdasarkan data – data, antara lain menyajikan data, menganalisis data, dan menginterpretasikannya.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di RSUD Dr.Saiful Anwar Malang bagian instalasi radioterapi pada bulan Maret 2014 – April 2014.

3.3 Alat dan Sampel Penelitian

Penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data rekam medik pasien teleterapi Cobalt 60, yaitu pasien Ca Mammae dan Ca Cervix. Masing-masing kasus sejumlah 14 pasien sehingga total sampel sejumlah 28 pasien. Penelitian dilakukan dengan menganalisis hasil laboratorium darah meliputi jumlah eritrosit, leukosit, trombosit dan hemoglobin, anamnesa pasien dan pemeriksaan klinis dokter selama pasien melakukan penyinaran sampai selesai penyinaran.

Kriteria inklusi meliputi:

1. Pasien berusia ≤ 70 tahun
2. Pasien tidak menderita tumor atau kanker lain
3. Pasien belum pernah melakukan radioterapi
4. Data rekam medik pasien lengkap meliputi anamnesa pasien dan diagnosa klinis dokter sebelum menjalani penyinaran
5. Pasien melakukan pemeriksaan darah (eritrosit, leukosit, trombosit dan hemoglobin) minimal 3 kali yaitu 1 kali sebelum penyinaran dan 2 kali setelah penyinaran

Kriteria eksklusi meliputi:

1. Pasien menolak melanjutkan radioterapi
2. Pasien meninggal

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

Dosis radiasi external teleterapi Cobalt 60

3.4.2 Variabel Terikat

Jumlah sel darah, yaitu eritrosit, leukosit, trombosit dan Hb.

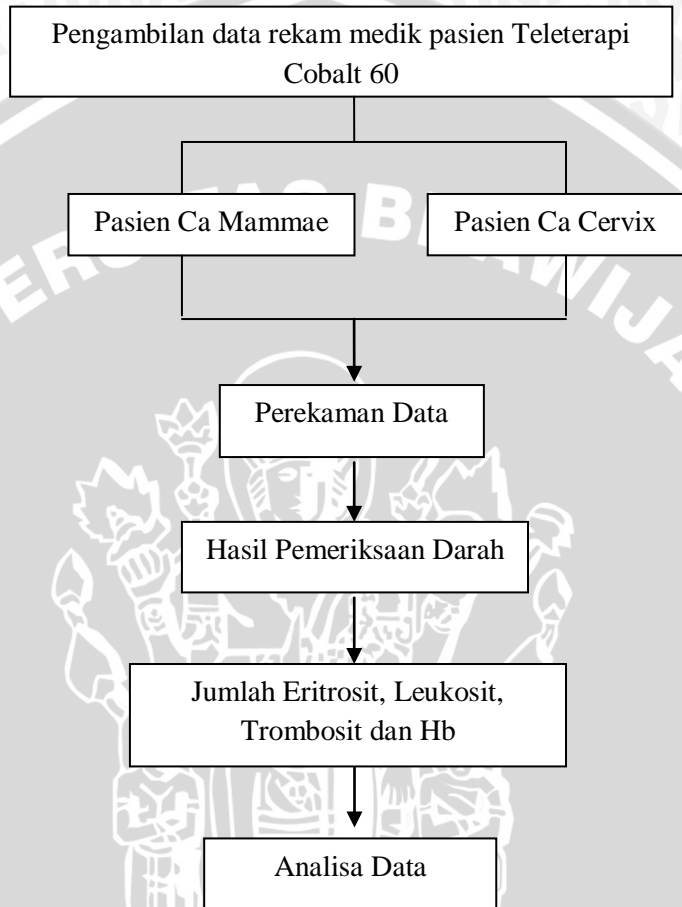
3.5 Tahap Penelitian

3.5.1 Pengumpulan Data Rekam Medik Pasien

Pada penelitian ini diambil sampel penelitian dengan dosis total pada pasien sebesar 50 Gy. Dosis ini diberikan secara fraksinasi 2 Gy per treatment sehingga total dilakukan 25 kali treatment. Setiap 5 kali treatment dilakukan jeda dan kontrol kondisi pasien.

Pengamatan hasil pemeriksaan darah dilakukan pada pasien yang rutin melakukan pemeriksaan darah dan memenuhi kriteria penelitian. Data hasil pemeriksaan darah sebelum pasien mendapat terapi penyinaran merupakan data awal sebagai bahan analisa pengaruh radiasi terhadap produksi sel darah. Hasil pemeriksaan darah ini juga untuk melihat kondisi pasien memenuhi syarat dilakukan penyinaran atau tidak. Penyinaran dapat dilakukan jika jumlah eritrosit, leukosit, trombosit dan hemoglobin dalam range normal. Setelah mendapat dosis tertentu selama penyinaran, pasien juga melakukan pemeriksaan darah untuk melihat kondisi tubuh pasien dan sebagai pertimbangan tindakan selanjutnya yang akan diambil, penyinaran akan dilanjutkan atau ditunda. Pada pasien dengan jumlah sel darah di bawah range normal, biasanya dilakukan transfusi darah. Kemudian setelah produksi sel darah kembali normal maka penyinaran akan dilanjutkan kembali. Untuk itu pemeriksaan darah ini menjadi bagian yang sangat penting dalam pemantauan efek radiasi dan kondisi tubuh pasien. Pengambilan data pemeriksaan darah setelah mendapat radiasi pada dosis tertentu dilakukan minimal 2 kali sebagai faktor pembanding sehingga dapat ditarik suatu kesimpulan pengaruh dosis radiasi terhadap produksi sel darah.

3.5.2 Alur Penelitian



3.6 Analisa Data.

Data hasil pemeriksaan darah dikelompokkan berdasarkan besarnya dosis dan kasus. Kemudian dibuat hubungan antara dosis radiasi dan jumlah sel darah dalam bentuk grafik. Pertama dibuat grafik untuk masing-masing pasien. Kemudian grafik dikelompokkan berdasarkan kasus sehingga pada 1 kasus akan dihasilkan 4 grafik, yaitu grafik

eritrosit, leukosit, trombosit dan Hb. Maka secara keseluruhan untuk 2 kasus yang diamati ada 8 grafik. Kemudian dari 8 grafik ini akan dianalisa kaitan anta dosis radiasi dengan produksi sel darah dalam tubuh

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Identifikasi Sampel

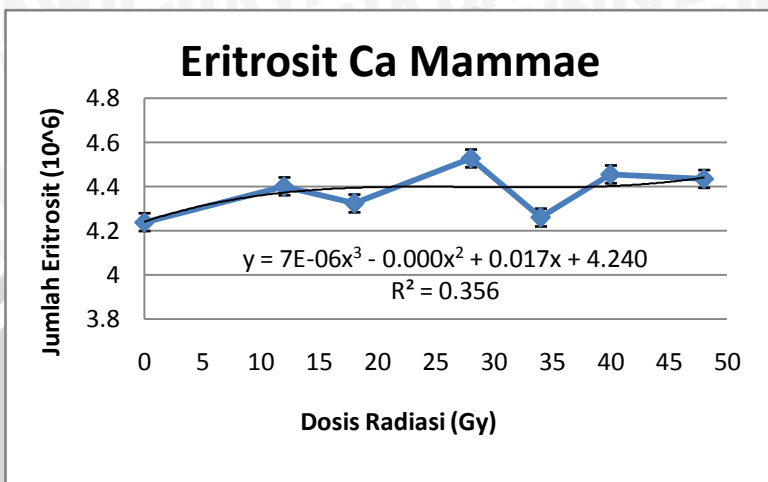
Berdasarkan studi kasus yang telah dilakukan selama bulan Maret sampai dengan bulan April 2014 di RSUD Dr. Saiful Anwar Malang bagian instalasi radioterapi, maka diperoleh sampel sebanyak 28 sampel. Dari 28 sampel ini rinciannya adalah 14 kasus Ca Mammae dan 14 kasus Ca Cervix. Dosis total radiasi adalah 50 Gy, dengan dosis radiasi per fraksi adalah 2 Gy. Setelah 5 kali fraksi atau setelah pasien mendapat dosis radiasi sebesar 10 Gy, akan diberi jeda selama 2 hari sebelum pasien mendapatkan dosis fraksinasi selanjutnya. Pengamatan efek radiasi terhadap produksi sel darah dilakukan minimal tiga kali, yaitu 1 kali sebelum penyinaran dan 2 kali selama atau setelah penyinaran pada dosis tertentu.

Spesifikasi peralatan radioterapi yang digunakan di RSUD Dr. Saiful Anwar Malang adalah sebagai berikut :

Nama alat	: Pesawat Teleterapi Cobalt 60
Merk alat	: GWXJ80
Tahun pembuatan	: 2007
Sumber radioaktif	: Cobalt 60
Aktivitas	: 6000 Ci
Waktu paruh	: 5,27 tahun

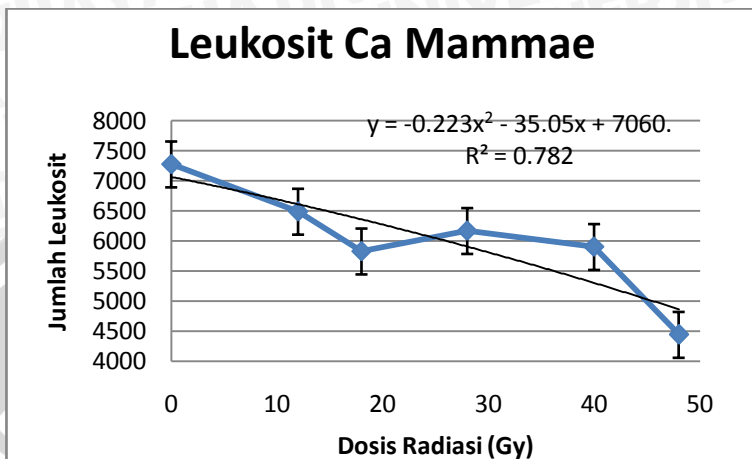
4.2 Hasil Penelitian

Pada penelitian ini didapatkan data hasil penelitian masing-masing kasus tercantum pada Tabel 4.1 dan 4.2 pada lampiran. Untuk mempermudah analisa data maka dibuat grafik hubungan antara jumlah dosis radiasi pada sumbu x dan jumlah sel darah pada sumbu y.



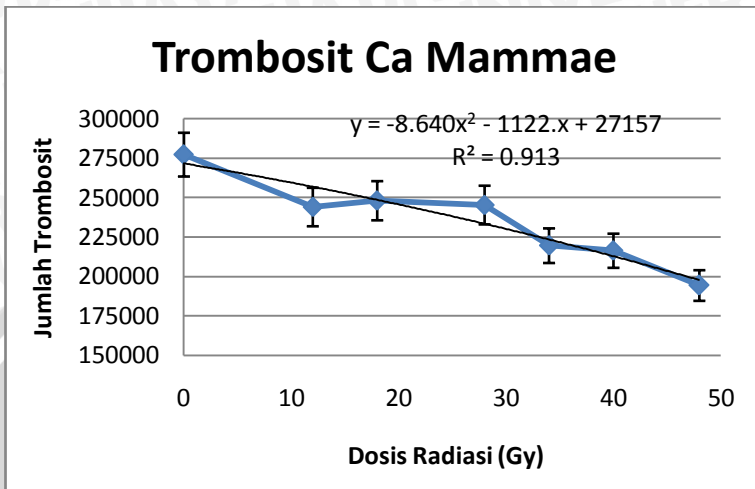
Gambar 4.1 Grafik hubungan antara dosis radiasi dan produksi eritrosit pada kasus Ca Mammae

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat, dosis radiasi yang diberikan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap produksi eritrosit penderita Ca Mammae. Produksi eritrosit naik 3,82 % setelah mendapat dosis radiasi 12 Gy dan turun 1,76 % pada dosis 18 Gy. Sel eritrosit mengalami perubahan selama pemberian dosis fraksinasi dan cenderung naik. Eritrosit naik 4,72 % pada dosis 28 Gy dan naik 4,59 % pada dosis 40 Gy. Penurunan jumlah eritrosit terjadi pada dosis 34 Gy sebesar 5,92 % dan turun 0,46 % pada dosis radiasi 48 Gy. Untuk melihat korelasi data maka dibuat interpolasi grafik secara polinomial dan menghasilkan regresi 0,356. Nilai ini menunjukkan bahwa data penelitian memiliki tingkat korelasi tidak bagus karena nilai regresinya jauh dari 1.



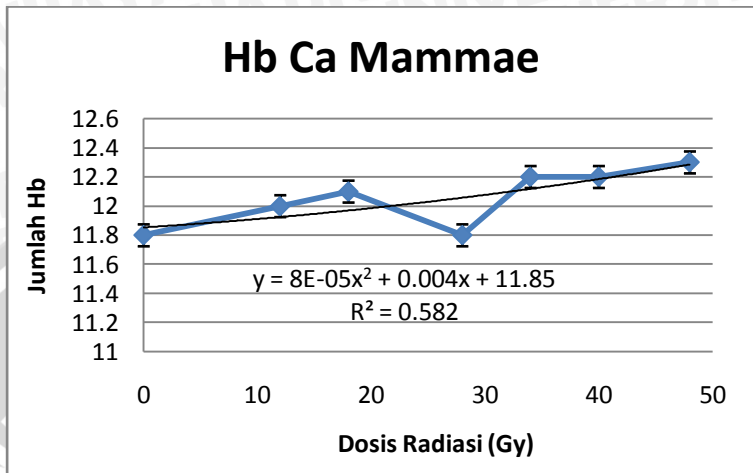
Gambar 4.2 Grafik hubungan antara dosis radiasi dan produksi leukosit pada kasus Ca Mammae

Berdasarkan Gambar 4.2, jumlah leukosit menunjukkan perubahan signifikan selama pemberian dosis fraksinasi. Jumlah leukosit cenderung turun seiring dengan bertambahnya dosis radiasi. Sel leukosit turun 4,31 % pada dosis 40 Gy dan turun 24,75 % pada dosis 48 Gy. Produksi leukosit mengalami peningkatan setelah menerima dosis radiasi 28 Gy sebesar 5,84 % dan naik 7,15 % pada dosis radiasi 34 Gy. Interpolasi grafik secara polinomial menghasilkan regresi 0,782. Nilai ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat korelasi cukup bagus karena nilai regresinya mendekati 1.



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara dosis radiasi dan produksi trombosit pada kasus Ca Mammae

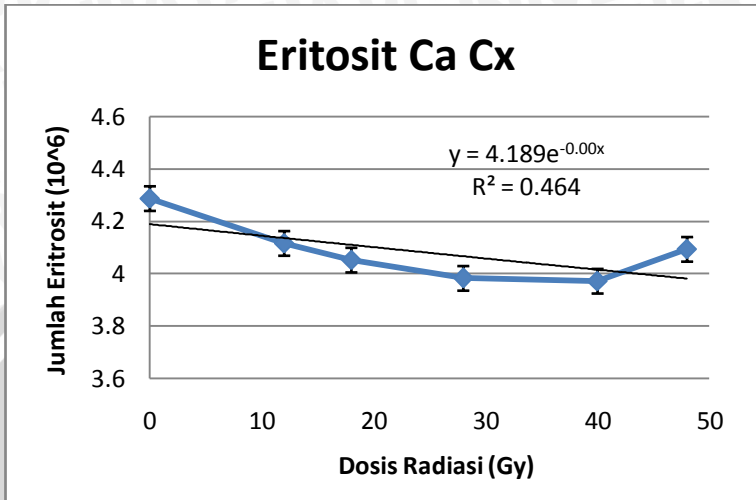
Pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa dosis radiasi yang diberikan memberikan pengaruh signifikan terhadap produksi trombosit penderita Ca Mammae dan cenderung turun. Menurut Campbell, dkk, (2002), paparan radiasi pengion dapat menyebabkan trombositopenia atau penurunan jumlah trombosit total. Prosentase penurunan trombosit paling besar terjadi pada dosis radiasi 10 Gy yaitu 11,98 %.Produksi trombosit turun 10,49 % pada dosis 34 Gy dan turun 10,19 % pada dosis 48 Gy. Jumlah trombosit hanya naik pada dosis 18 Gy yaitu sebesar 1,64 %. Untuk melihat keakuratan data maka dilakukan interpolasi grafik secara polinomial dan menghasilkan regresi 0,913. Nilai ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat korelasi yang bagus karena nilai regresinya mendekati 1.



Gambar 4.4 Grafik hubungan antara dosis radiasi dan produksi Hb pada kasus Ca Mammae

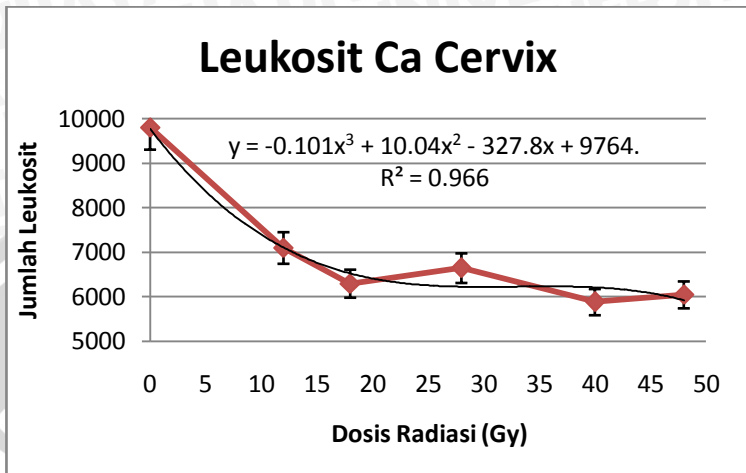
Dosis radiasi tidak mempengaruhi jumlah Hb secara signifikan dan cenderung naik seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Prosentase perubahan produksi Hb sangat kecil. Bahkan, pada dosis radiasi 40 Gy produksi Hb relatif tetap dan tidak mengalami perubahan. Dapat dilihat pada gambar, prosentase perubahan produksi Hb terbesar pada dosis 34 Gy, yaitu jumlah Hb naik 3,39 %. Range normal untuk Hb adalah 11,5-15,1 gr/dL. Pada Tabel 4.1 di lampiran dapat dilihat, Hb penderita berada dalam range normal yaitu antara 11,8-12,3 gr/dL. Interpolasi grafik yang dilakukan secara polinomial menghasilkan regresi 0,582. Nilai ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat korelasi kurang bagus karena nilai regresinya tidak mendekati 1.

Berikutnya adalah kasus Ca Cervix. Pada kasus ini digunakan sampel sejumlah 14 pasien. Tabel 4.2 menunjukkan jumlah sel darah dengan dosis radiasi (dapat dilihat di lampiran).



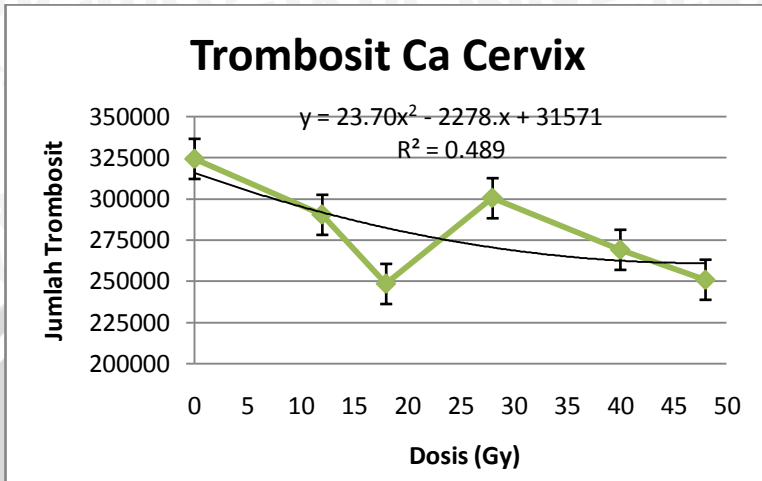
Gambar 4.5 Grafik hubungan antara dosis radiasi dan produksi eritrosit pada kasus Ca Cervix

Dari data pada Gambar 4.5 menunjukkan dosis radiasi tidak mempengaruhi produksi eritrosit penderita Ca Cervix secara signifikan. Produksi eritrosit cenderung turun selama pemberian dosis fraksinasi. Produksi eritrosit terus menurun mulai pemberian dosis fraksinasi 12 Gy sampai 40 Gy. Prosentase penurunan produksi eritrosit terbesar terjadi pada dosis 12 Gy sebesar 3,9 %. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar dosis radiasi yang diberikan maka produksi eritrosit akan semakin menurun. Pada dosis radiasi 48 Gy, produksi eritrosit naik 3,06 %. Interpolasi grafik secara eksponensial menghasilkan regresi 0,464. Nilai ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat korelasi kurang bagus karena nilai regresinya tidak mendekati 1.



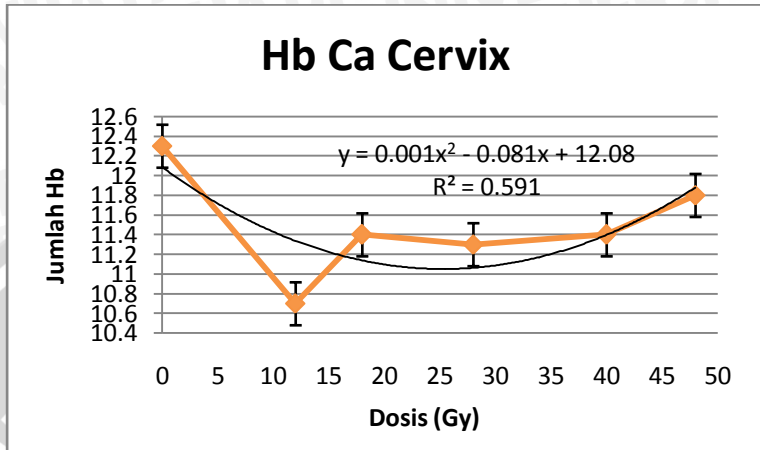
Gambar 4.6 Grafik hubungan antara dosis radiasi dan produksi leukosit pada kasus Ca Cervix

Penyinaran radioterapi mempengaruhi produksi leukosit penderita Ca Cervix secara signifikan seperti ditunjukkan pada gambar 4.6. Radiasi menyebabkan penurunan produksi leukosit. Pada gambar dapat dilihat, jumlah leukosit turun 27,5 % setelah menerima dosis radiasi 12 Gy dan turun 16 % setelah menerima dosis radiasi 40 Gy. Peningkatan produksi leukosit terjadi pada dosis 28 Gy sebesar 5,53 % dan pada dosis 48 Gy naik 8,3 %. Dari interpolasi grafik yang dilakukan secara polinomial dihasilkan nilai regresi 0,966. Nilai ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat korelasi yang bagus karena nilai regresinya mendekati 1.



Gambar 4.7 Grafik hubungan antara dosis radiasi dan produksi trombosit pada kasus Ca Cervix

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat, dosis radiasi yang diberikan selama penyinaran radioterapi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap produksi trombosit penderita Ca Cervix. Jumlah trombosit cenderung menurun seiring dengan bertambahnya dosis radiasi. Prosentase penurunan terbesar pada dosis 18 Gy yaitu turun 14,4 % dan pada dosis radiasi 40 Gy , jumlah trombosit turun 10,4 % . Jumlah trombosit naik 10,9 % setelah menerima dosis radiasi 28 Gy. Interpolasi grafik yang dilakukan secara polinomial menghasilkan regresi 0,489. Nilai ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat korelasi kurang bagus karena nilai regresinya tidak mendekati 1.



Gambar 4.8 Grafik hubungan antara dosis radiasi dan produksi Hb pada kasus Ca Cervix

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat, dosis radiasi memberikan pengaruh cukup signifikan terhadap produksi Hb pada dosis awal fraksinasi. Produksi Hb turun 13 % setelah mendapat dosis radiasi 12 Gy dan naik 6,54 % setelah menerima dosis radiasi 18 Gy. Pengaruh dosis radiasi sangat kecil setelah dosis radiasi mencapai 28 Gy. Jumlah Hb hanya turun 0,9 % setelah mendapat dosis radiasi 28 Gy. Produksi Hb cenderung turun setelah menerima dosis radiasi. Sebelum menjalani penyinaran, jumlah Hb adalah 12,3 gr/dL. Setelah mendapat dosis fraksinasi radioterapi dengan dosis total 50 Gy, jumlah Hb turun menjadi 11,8 gr/dL. Untuk melihat keakuratan data maka dilakukan interpolasi grafik secara polinomial dan menghasilkan regresi 0,591. Nilai ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat korelasi kurang bagus karena nilai regresinya mendekati 1.

4.3 Pembahasan

Interaksi radiasi dengan sel dapat menyebabkan kerusakan sel atau bahkan kematian sel. Kerusakan dapat meluas dari skala seluler ke jaringan, organ dan kematian individu. Interaksi radiasi dengan sel ini melalui 4 tahapan. Tahap pertama adalah tahap fisik. Pada tahap ini terjadi ionisasi dan eksitasi

pada atom atau molekul biologis dalam sel karena terkena paparan radiasi pengion. Tahap kedua adalah tahap fisikokimia. Pada tahap ini atom atau molekul yang telah tereksitasi atau terionisasi mengalami reaksi-reaksi sehingga terbentuk radikal bebas yang tidak stabil dan berbahaya bagi tubuh. Tahap ketiga adalah tahap kimia dan biologi. Radikal bebas yang terbentuk tersebut berikatan dengan molekul organik sel dan inti sel yang terdiri atas kromosom sehingga terjadi mutasi genetik. Tahap terakhir adalah tahap biologi. Pada tahap ini kerusakan sel akibat paparan radiasi pengion sudah dapat diamati. Kerusakan pada sel sumsum tulang ditandai dengan penurunan produksi sel darah meliputi, eritrosit, leukosit, trombosit dan hemoglobin.

Elemen pembentuk darah meliputi sel darah merah (eritrosit), sel darah putih (leukosit) dan trombosit. Pada orang dewasa, sel darah hanya terbentuk pada sumsum tulang merah yang ditemukan dalam tulang membranosa seperti sternum, iga, vertebra dan tulang pelvis. Luas lapangan penyinaran radioterapi pada pasien Ca Mammae dan Ca Cervix mencakup sumsum tulang merah tersebut. Paparan radiasi pengion pada sumsum tulang ini mempengaruhi sistem hemopoetik dan menimbulkan hambatan dalam produksi sel darah (Slonane, 2003).

Produksi eritrosit dikontrol oleh mekanisme umpan balik negatif yang sensitif terhadap suplai oksigen pada jaringan tubuh. Jika jaringan tubuh tidak menerima oksigen yang memadai, ginjal akan mengubah sejenis protein plasma menjadi hormon yang disebut eritropoetin. Eritropoetin merangsang produksi eritrosit dalam sumsum tulang. Peningkatan produksi eritrosit dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Contohnya, pendarahan yang mengakibatkan kehilangan darah dapat memicu peningkatan produksi eritrosit. Gagal jantung juga dapat meningkatkan produksi eritropoetin dan menstimulasi produksi eritrosit karena jantung tidak dapat berfungsi secara optimal sehingga menyebabkan berkurangnya aliran darah ke jaringan. Peningkatan produksi eritrosit juga terjadi pada penderita penyakit paru karena volume oksigen yang diabsorpsi oleh darah kurang. Selain itu produksi sel darah juga dipengaruhi oleh hormon lain, seperti kortison, hormon tiroid, dan hormon pertumbuhan (Slonane, 2003).

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat, produksi eritrosit penderita Ca Mammae cenderung naik setelah menerima radiasi. Menurut Slonane (2003), radiasi pengion yang diberikan selama radioterapi menyebabkan penurunan produksi eritrosit. Jika produksi eritrosit naik karena penyakit jantung atau paru, maka jumlah eritrosit akan terus naik seiring waktu. Hal tersebut menunjukkan peningkatan produksi eritrosit kemungkinan disebabkan oleh variasi individu. Pada penelitian ini menggunakan sampel manusia, dimana sampel ini memiliki variasi umur, berat badan, kondisi fisik, lingkungan, dan asupan gizi yang berbeda-beda. Perbedaan tersebut mempengaruhi kemampuan adaptasi dan ketahanan sel terhadap paparan radiasi. Pada dosis awal fraksinasi, jumlah eritrosit akan menurun. Pada dosis fraksinasi berikutnya, jika kondisi pasien bagus, sumsum tulang akan melakukan adaptasi sehingga produksi eritrosit naik secara perlahan. Penambahan paparan radiasi secara terus menerus akan menyebabkan sumsum tulang mengalami titik jenuh sehingga tidak mampu melakukan adaptasi lagi dan produksi sel darah akan menurun secara perlahan.

Analisis regresi merupakan suatu metode statistik untuk memodelkan hubungan antara suatu variabel bebas x dan variabel terikat y . Analisis regresi dilakukan untuk mencari suatu kurva yang mewakili hubungan satu set data (Luknanto, 1992). Pada grafik hasil penelitian ini digunakan regresi bentuk polinomial dan ekponensial karena regresi polinomial dan eksponensial merupakan jenis kurva yang terbaik untuk mewakili data hasil penelitian. Nilai regresi yang mendekati 1 menunjukkan grafik yang dihasilkan memiliki tingkat korelasi yang bagus. Korelasi menyatakan derajat hubungan antara dua variabel, yaitu variabel bebas pada sumbu x (dosis radiasi) dan variabel terikat pada sumbu y (jumlah sel darah).

Menurut Campbell, dkk (2002), leukosit berfungsi untuk melindungi tubuh terhadap invasi benda asing, seperti bakteri dan virus. Infeksi atau kerusakan jaringan mengakibatkan peningkatan total jumlah leukosit. Peningkatan leukosit juga dapat disebabkan oleh leukimia. Leukimia adalah sejenis kanker yang ditandai dengan proliferasi sel darah putih yang tidak terkendali. Leukimia dapat menyebabkan terjadinya kegagalan

sumsum tulang. Leukimia menekan fungsi sumsum tulang, menyebabkan kombinasi dari anemia (penurunan jumlah eritrosit), leukopenia (penurunan jumlah leukosit total), dan trombositopenia (penurunan jumlah trombosit total).

Gambar 4.2 menunjukkan radiasi yang diberikan menyebabkan penurunan signifikan terhadap produksi leukosit penderita Ca Mammae. Produksi leukosit meningkat setelah menerima dosis radiasi 28 Gy dan 34 Gy. Jika produksi leukosit meningkat disebabkan oleh infeksi atau timbulnya kanker sekunder maka sel leukosit akan terus meningkat hingga dosis fraksinasi selesai. Pada gambar dapat dilihat, jumlah sel leukosit kembali menurun setelah menerima dosis radiasi 40 Gy dan 48 Gy. Hal ini dapat disebabkan oleh variasi individu sehingga menimbulkan variasi adaptasi sel darah terhadap paparan radiasi pengion.

Pada penderita Ca Mammae, penyinaran dilakukan pada tiga arah penyinaran, yaitu supraclavicula, axial dan tangensial. Pada penyinaran arah supraclavicula, sinar radiasi mengenai kelenjar getah bening yang berfungsi dalam pembentukan leukosit dan berkaitan dengan sistem kekebalan tubuh. Radiasi yang mengenai kelenjar getah bening ini dapat menyebabkan penurunan produksi leukosit sehingga menurunkan sistem kekebalan tubuh.

Trombosit berfungsi dalam mekanisme pembekuan darah dan pemulihan pembuluh darah yang luka. Trombositopenia adalah suatu kondisi dimana jumlah trombosit kurang dari normal. Trombositopenia dapat disebabkan oleh reaksi awal obat-obatan, malignansi sumsum tulang, atau radiasi pengion yang merusak sumsum tulang. Keadaan sebaliknya disebut trombositosis, yaitu peningkatan jumlah trombosit karena pendarahan, terutama anemia karena kehilangan darah yang kronis, infeksi, pascabedah, keganasan dan penyakit inflamasi. Peningkatan jumlah trombosit ini menyebabkan peningkatan penggumpalan darah (Campbell, dkk, 2002).

Produksi trombosit penderita Ca Mammae mengalami penurunan signifikan akibat penyinaran radioterapi. Berdasarkan gambar 4.3, jumlah trombosit cenderung turun dan hanya naik pada saat menerima dosis 18 Gy, yaitu naik sebesar 1,64 %.

Prosentase ini sangat kecil jika dibandingkan dengan prosentase penurunan trombosit yang mencapai hingga 11,98 % pada dosis 10 Gy. Jika peningkatan produksi trombosit disebabkan pendarahan, jumlah eritrosit dan Hb masih dalam range normal (dapat dilihat pada Tabel 4.1 di lampiran). Hal ini mengindikasikan peningkatan produksi trombosit tidak disebabkan oleh pendarahan. Peningkatan jumlah trombosit dapat disebabkan oleh variasi individu sehingga menyebabkan kemampuan adaptasi yang bervariasi.

Hemoglobin merupakan sejenis protein pengikat dan pembawa oksigen. Setiap eritrosit mengandung sekitar 300 juta molekul hemoglobin. Jumlah hemoglobin sangat berkaitan dengan jumlah eritrosit dalam tubuh. Pada kondisi klinis tertentu seperti anemia, jumlah eritrosit dan hemoglobin bisa saja tidak sesuai. Anemia adalah defisiensi eritrosit atau kekurangan hemoglobin. Hal ini mengakibatkan penurunan jumlah eritrosit atau jumlah eritrosit tetap normal tetapi jumlah hemoglobinnya di bawah normal (Campbell, dkk, 2002).

Gambar 4.4 menunjukkan penyinaran radioterapi yang dilakukan tidak mempengaruhi jumlah Hb penderita Ca Mammae secara signifikan. Jumlah Hb penderita cenderung naik setelah menerima radiasi. Peningkatan produksi Hb tersebut dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan. Kemungkinan pertama, jumlah Hb naik karena injeksi obat eritropoetin yang diberikan kepada penderita selama penyinaran radioterapi sehingga produksi Hb meningkat. Menurut Stringer (2006), salah satu obat yang digunakan untuk mengobati anemia adalah eritropoietin. Efek utama obat ini adalah merangsang eritropoesis atau merangsang produksi eritrosit dalam sumsum tulang. Eritropoetin dapat disuntikkan secara intravena atau di bawah kulit (subkutan). Kemungkinan kedua karena variasi individu sehingga menyebabkan variasi adaptasi sel darah terhadap paparan radiasi.

Anemia adalah suatu keadaan dimana kadar hemoglobin plasma di bawah normal. Keadaan tersebut menggambarkan penurunan jumlah sel darah merah dan kandungan hemoglobin total secara abnormal dalam sirkulasi (Stringer, 2006). Anemia mengakibatkan penurunan konsentrasi sel darah merah dan

hemoglobin di dalam pembuluh darah perifer. Nilai darah normal pada perempuan lebih rendah 10 % daripada laki-laki. Penderita anemia mempunyai penurunan yang lebih dari 10 % di bawah nilai darah normal untuk jenis kelamin yang sama (Eugene, dkk, 1995). Anemia dapat disebabkan oleh banyak hal, diantaranya kanker sumsum tulang, perusakan sumsum tulang oleh proses autoimun, defisiensi vitamin, kemoterapi dan radiasi. Salah satu cara pengobatan yang dilakukan pada penderita anemia adalah pemberian obat yang berfungsi untuk merangsang fungsi sumsum tulang sehingga meningkatkan produksi sel darah dan hemoglobin dalam tubuh (Corwin, 2009).

Produksi eritrosit penderita Ca Cervix cenderung menurun setelah menerima dosis radiasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5. Jumlah eritrosit hanya naik setelah mendapat dosis 48 Gy, yaitu naik 3,06 %. Ada dua kemungkinan penyebab produksi eritrosit meningkat. Kemungkinan pertama adalah pasien menderita penyakit jantung, paru atau kelainan produksi hormon sehingga menyebabkan jumlah eritrosit meningkat. Kemungkinan kedua karena variasi individu sehingga menyebabkan kemampuan adaptasi yang bervariasi.

Gambar 4.6 menunjukkan produksi leukosit menurun secara signifikan setelah diberikan penyinaran radioterapi. Peningkatan produksi leukosit pada dosis 28 Gy dan 48 Gy kemungkinan karena variasi adaptasi individu. Jika produksi leukosit naik karena terjadi infeksi atau timbul kanker sekunder, maka produksi leukosit terus meningkat seiring dengan bertambahnya dosis fraksinasi. Pada Gambar 4.6 dapat dilihat, jumlah leukosit turun 16 % setelah menerima dosis 40 Gy. Hal ini menunjukkan naiknya leukosit tidak disebabkan oleh infeksi atau kanker sekunder.

Produksi trombosit penderita Ca Cervix cenderung menurun setelah mendapat penyinaran radioterapi, seperti tampak pada gambar 4.7. Peningkatan produksi trombosit pada dosis 28 Gy sebesar 10,9 % dapat dianalisa dari beberapa kemungkinan. Jika produksi trombosit naik karena pendarahan, dapat ditinjau dari dua hal yaitu jumlah eritrosit dan Hb. Jumlah Hb masih dalam range normal, sedangkan jumlah eritrosit 0,4 % di bawah range normal. Jumlah eritrosit yang berada di bawah

range normal ini tidak sampai memerlukan transfusi darah sehingga tidak sampai mempengaruhi produksi trombosit. Hal ini mengindikasikan, peningkatan jumlah trombosit tidak disebabkan oleh pendarahan. Kemungkinan naiknya jumlah trombosit disebabkan oleh variasi individu yang digunakan sebagai sampel penelitian mempunyai kemampuan adaptasi yang berbeda-beda. Individu yang memiliki kondisi fisik yang bagus memiliki kemampuan adaptasi yang baik sehingga sumsum tulang mampu bertahan terhadap paparan radiasi.

Produksi Hb penderita Ca Cervix menunjukkan penurunan setelah mendapat penyinaran radioterapi, seperti tampak pada Gambar 4.8. Peningkatan produksi Hb setelah menerima dosis radiasi 18 Gy dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan. Kemungkinan pertama karena injeksi obat eritropoetin sehingga produksi Hb meningkat. Kemungkinan kedua karena sumsum tulang melakukan mekanisme adaptasi sehingga produksi Hb Naik.

Sel sumsum tulang termasuk sel yang sensitif terhadap radiasi. Menurut hukum Bergonie-Tribondeau menyatakan bahwa semakin aktif suatu sel berproliferasi maka akan semakin sensitif pula sel tersebut terhadap radiasi. Sel sumsum tulang termasuk sel yang aktif berproliferasi sehingga sel sumsum tulang termasuk sel yang rentan terhadap kerusakan akibat paparan radiasi pengion (Corwin, 2009).

Berdasarkan data hasil penelitian dan grafik, radioterapi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap leukosit dan trombosit, tetapi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap eritrosit dan hemoglobin. Menurut Slonane (2003), semakin besar dosis radiasi yang diterima maka jumlah sel darah semakin menurun. Dari grafik dapat dilihat jumlah sel darah mengalami kenaikan dan penurunan selama pemberian dosis fraksinasi radioterapi.

Tubuh terdiri atas berbagai jenis sel dan jaringan dengan tingkat kematangan yang berbeda, sebagian matang dan sebagian belum matang. Perbedaan inilah yang menyebabkan setiap sel memiliki tingkat radiosensitivitas yang berbeda-beda. Sel eritrosit relatif kurang radiosensitif karena umurnya yang panjang (sekitar 4 bulan) dibanding dengan leukosit yang hanya

berumur satu hari atau kurang. Sel limfosit yang merupakan bagian dari sel leukosit adalah sel yang paling sensitif terhadap radiasi . Pengaruh radiasi pada leukosit adalah timbulnya leukopenia (penurunan jumlah leukosit total) yang bisa dilihat setelah 24 jam pasca radiasi (Barbara & Billie, 2005).

Radioterapi yang diberikan pada penderita Ca Cervix dan Ca Mammae mengenai sumsum tulang sehingga dapat mengganggu sistem hemopoetik. Apabila sumsum tulang terpajan radiasi pengion, maka akan terjadi depresi jumlah sel di sirkulasi darah. Radiasi pengion menyebabkan penurunan jumlah sel imatur sehingga menyebabkan pengurangan jumlah total sel darah yang matang (Barbara & Billie, 2005).

Pada kasus Ca Mammae, produksi eritrosit dan Hb justru naik setelah mendapat penyinaran radioterapi. Sedangkan sel trombosit dan leukosit menunjukkan penurunan setelah terpajan radiasi pengion. Produksi leukosit turun 38,93 %, sel trombosit turun 29,96 %, eritrosit naik 4,72 % dan Hb naik 4,24 % (perhitungan dapat dilihat pada lampiran). Sel leukosit dan trombosit merupakan sel darah yang paling sensitif terhadap radiasi, jumlah leukosit dan trombosit antara sebelum pemberian radioterapi dan sesudah pemberian dosis fraksinasi radioterapi memiliki perbedaan yang bermakna, sedangkan sel eritrosit dan Hb tergolong resisten terhadap radiasi.

Pada kasus Ca Cervix, semua sel darah menurun setelah menerima dosis radiasi, terutama sel leukosit menunjukkan penurunan sangat tajam. Sel leukosit turun 38,3 % setelah terpajan radiasi pengion sejumlah 50 Gy. Trombosit turun 22,53 %, eritrosit turun 4,66 % dan Hb turun 4,07 %. Radiasi pengion mengganggu sistem hemopoetik dan menyebabkan penurunan jumlah total sel darah.

Penderita Ca Cervix dan Ca Mammae memiliki peluang yang sama besar mengalami kerusakan sumsum tulang sehingga menyebabkan penurunan jumlah total sel darah, terutama sel leukosit dan trombosit. Besarnya penurunan sel darah tergantung dari besarnya dosis radiasi yang diterima, jumlah sel sumsum tulang yang terkena radiasi dan kemampuan sel sumsum tulang melakukan regenerasi. Pemberian dosis radiasi secara terbagi atau fraksinasi juga bertujuan untuk mengurangi efek radiasi,

karena dengan adanya dosis fraksinasi akan memberikan kesempatan pada sel sehat untuk meregenerasi dirinya.

Efek radiasi yang ditimbulkan oleh penyinaran teleterapi Cobalt 60 ini dapat diminimalisir dengan melakukan proteksi radiasi. Penerapan asas proteksi radiasi berupa justifikasi, limitasi, dan optimasi dapat meminimalisir efek radiasi. Simulasi yang dilakukan sebelum penyinaran untuk menentukan luas lapangan radiasi, arah penyinaran, jarak sentrasi dan sudut penyinaran harus cermat dan teliti sehingga terapi yang diberikan dapat membunuh sel kanker, tetapi efek pada jaringan sehat seperti sumsum tulang dapat diminimalisir. Penggunaan blok untuk melindungi jaringan sehat dan penentuan marker sebagai batas-batas lapangan penyinaran juga harus sesuai dengan kondisi tumor pasien dan jaringan sehat di sekitar tumor. Sumsum tulang memiliki peranan yang sangat vital untuk pembentukan sel darah dan termasuk sel yang radiosensitif terhadap radiasi sehingga perlu perhatian khusus dalam penentuan rencana penyinaran.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, radioterapi yang diberikan pada penderita Ca Mammae dan Ca Cervix dapat mempengaruhi produksi sel darah. Penderita Ca Cervix dan Ca Mammae memiliki peluang yang sama besar mengalami kerusakan sumsum tulang sehingga menyebabkan gangguan sistem hemopoetik, terutama sel leukosit dan trombosit.

Jumlah leukosit dan trombosit menunjukkan perubahan signifikan setelah menerima dosis radiasi, sedangkan eritrosit dan hemoglobin termasuk resisten terhadap radiasi. Penurunan produksi leukosit dapat menyebabkan penurunan sistem imun sehingga pasien radioterapi mudah terserang penyakit akibat infeksi, bakteri atau virus. Penurunan produksi trombosit dapat menyebabkan pasien mudah mengalami pendarahn karena sistem pembekuan darahnya terganggu.

5.2 Saran

Penelitian mengenai efek radioterapi khususnya terhadap sistem hemopoetik masih sangat kurang sehingga perlu penelitian lanjutan mengingat pengaruh ini bersifat sistemik dan terkait dengan keberhasilan radioterapi yang dilakukan. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan pada kasus kanker yang paling banyak dilakukan radioterapi, seperti kanker thyroid dan kanker nasofaring.

Upaya proteksi radiasi terhadap produksi sel darah juga perlu ditingkatkan. Paramedis yang terlibat dalam penyinaran radioterapi seharusnya menjadikan hal ini sebagai bahan pertimbangan dalam membuat perencanaan penyinaran.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

