BAB II

DASAR TEORI

2.1. Sinar-γ

Sinar-γ merupakan radiasi elektromagnetik yang terpancar dari inti-inti atom yang mengalami aktivasi, setelah mengalami transformasi radioaktif. Sinar-γ mempunyai sifat–sifat yang sama dengan sinar-X, tidak bermuatan listrik, tidak dipengaruhi oleh medan magnet maupun medan listrik, mampu menembus bahan, menimbulkan fluorosensi, menghitamkan plat film, mengionisasi gas dan dapat merusak jaringan tubuh (Widjaja, 1988).

Energi sinar-γ lebih besar dibandingkan energi partikel-β maupun energi partikel-α . Emisi sinar-γ dengan energi besar mempunyai daya tembus yang besar pula. Kemampuan sinar-γ menembus bahan tergantung energinya, komposisi dan ketebalan medium yang dilalui. Semakin tinggi daya tembusnya, semakin rapat komposisi dan semakin tebal medium yang dilewati maka kemampuan menembusnya akan berkurang (Susetyo,1988).

Cobalt-60 dibuat dalam reaktor nuklir dengan membombardir unsur Cobalt yang stabil dengan neutron sehingga menjadi zat radioaktif dengan waktu paruh 5,3 tahun. Dengan waktu paruh tersebut berarti setelah 5,3 tahun aktifitasnya akan berkurang menjadi setengahnya dan 3/4 dari aktifitasnya akan meluruh setelah 10,6 tahun, sedangkan 7/8 aktifitas Cobalt-60 akan meluruh setelah 15,9 tahun. Aktifitas

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

sumber tidak pernah nol, akan tetapi dalam selang waktu tertentu aktifitas zat radioaktif memenuhi hukum eksponensial sebagai berikut : (Hay & Hughes, 1983)

$$At = Ao\ e^{-\lambda t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.1)$$

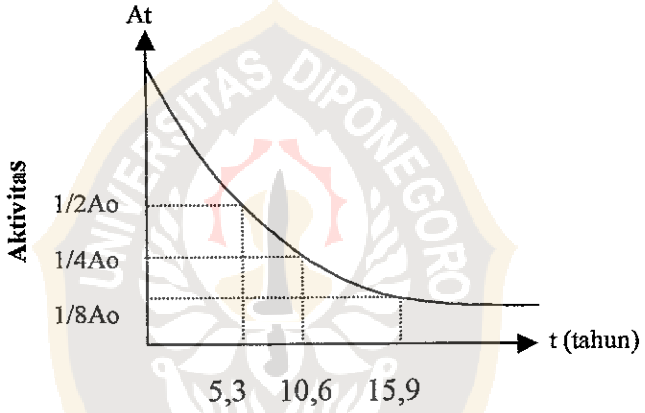
dengan ;

At = aktifitas sumber radiasi pada saat t (Ci)

Ao = aktifitas sumber saat t = 0 (Ci)

λ = konstanta peluruhan (menit^{-1})

t = waktu peluruhan (menit).

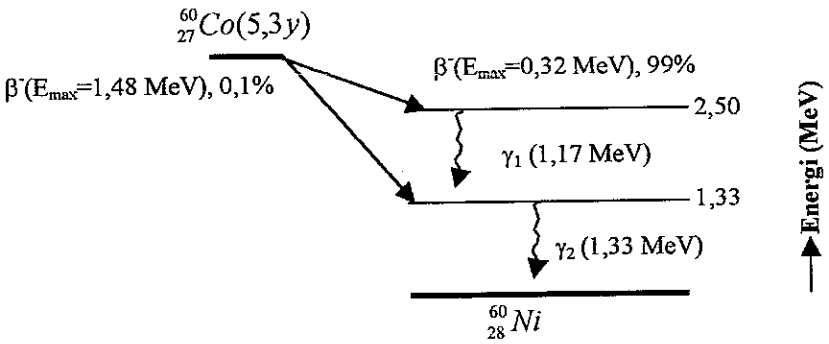


Grafik 2.1. Peluruhan Cobalt-60 (Hay & Hughes, 1983)

Sinar-γ dari Cobalt–60 mempunyai energi 1,1732 MeV dan 1,3325 MeV yang merupakan hasil pancaran peluruhan Cobalt–60 (Shapiro, 1981). Terbentuknya sinar-γ merupakan hasil disintegrasi inti atom, inti atom yang mengalami disintegrasi dengan memancarkan partikel-α akan terbentuk inti-inti baru dengan memiliki tingkat energi yang agak tinggi. Kemudian terjadi proses transisi ke tingkat energi

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

yang lebih rendah atau tingkat dasar sambil memancarkan sinar-γ seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram tingkat energi Cobalt-60 (Khan, 1994)

2.2. Cobalt – 60 dalam Radioterapi

Cobalt–60 yang memiliki energi tinggi sangat bermanfaat dalam bidang radioterapi. Secara garis besar penggunaan Cobalt–60 dalam radioterapi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu *teleterapi* dan *brakhiterapi*. *Teleterapi* berarti terapi radiasi dengan sumber radiasi berada di luar tubuh pasien, sedangkan *brakhiterapi* adalah terapi radiasi dengan sumber berada di dalam tubuh pasien. Dalam *teleterapi* jarak sumber radiasi dengan pasien 1 cm sampai 125 cm. (Marthin, 1992)

Dalam terapi radiasi eksternal dengan Cobalt – 60 terutama ditujukan untuk jaringan tumor yang ada di bawah permukaan kulit sebagai contoh adalah tumor nasofaring, tumor payudara, tumor paru, dan tumor rahim. (Marthin, 1992)

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.3. Sinar Pengion

Sinar pengion adalah gelombang elektromagnetik (foton) atau partikel berenergi yang dapat menimbulkan proses ionisasi bila melewati berbagai materi termasuk materi biologi (Gondhowiardjo, 2002).

Radiasi pengion dapat menimbulkan kerusakan pada jaringan tubuh pada tingkat penerimaan tertentu. Kerusakan jaringan oleh karena radiasi dikenal sebagai efek biologi radiasi pengion, dimana tingkat kerusakan yang terjadi tergantung dosis radiasi yang diserapnya. Dalam radioterapi efek radiasi pada jaringan sehat harus ditekan sekecil mungkin agar kerusakan yang menetap tidak terjadi (Akhadi, 2000).

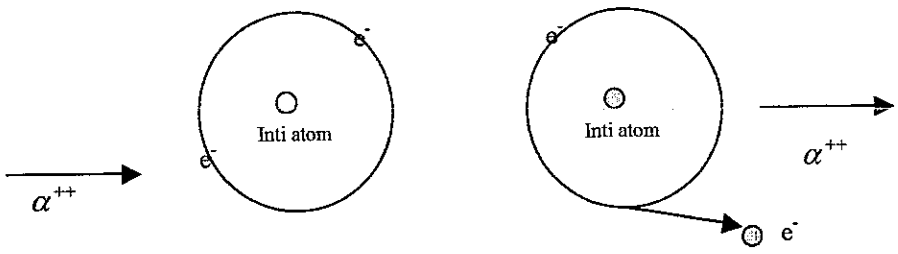
Efek radiasi pengion tergantung pada beberapa hal, yaitu energi radiasi pengion, luas lapangan radiasi, dosis radiasi, dan juga ditentukan oleh tingkat sensitifitas jaringan (Gabriel,1996). Dalam rencana terapi perlu memperhatikan sensitifitas pada beberapa organ. Seringkali lapangan radiasi dari berkas kolimator mengenai organ–organ lain yang sebetulnya tidak diinginkan seperti pada terapi radiasi *karsinoma nasofaring* dimana mukosa mulut masuk dalam lapangan kolimator yang bentuknya segi empat. Untuk itu sistem proteksi yang tepat sangat dibutuhkan (Travis,1984).

2.3.1. Proses Ionisasi

Jika elektron berpindah dari suatu atom, maka terbentuklah pasangan ion berupa elektron bebas yang bermuatan negatif (ion negatif) dan atom yang kekurangan elektron sehingga bermuatan positif (ion Positif). Muatan listrik pada

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

suatu atom bergantung pada jumlah elektron yang terlepas atau yang diperoleh. Proses ionisasi suatu atom ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Proses ionisasi atom (Gabriel, 1996).

2.3.2. Klasifikasi Radiasi Pengion

Dalam terminologi fisika, radiasi secara umum diartikan sebagai pancaran. Berkaitan dengan masalah ionisasi radiasi dapat dibagi menjadi dua, yaitu radisi bukan pengion dan radiasi pengion. Radiasi bukan pengion adalah jenis radiasi yang tidak mampu mengionisasi materi yang dilaluinya. Radiasi cahaya baik yang dipancarkan dari matahari maupun sumber-sumber lainnya merupakan contoh dari jenis bukan pengion (Akhadi, 2000).

2.3.3. Sumber Sinar Pengion (Gondhowiardjo, 2002)

Sumber sinar pengion ada dua yaitu : Generator listrik yang menghasilkan sinar-X dan sumber alamiah.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

1. Generator Listrik yang menghasilkan sinar-X, elektron,atau berbagai partikel pengion lainnya. Berdasarkan besar energi sinar pengion yang dihasilkan, pesawat radiasi jenis ini dibagi dalam:

   a. Jenis Ortovolt, yang menghasilkan sinar-X dengan energi 50–300 kV dan dihasilkan oleh tabung Rontgen. Jenis sinar ini dibagi lagi berdasarkan besarnya energi yang dihubungkan dengan penggunaannya menjadi kelompok; permukaan (*superfisial*), medium dan dalam (*deep*).

   b. Jenis Megavoltage, menghasilkan sinar dengan energi minimal 1 MV. Sinar ini dapat berupa foton, elektron, atau jenis partikel berat yang dapat dihasilkan oleh akselerator linier, betatron dan siklotron.

2. Sumber alamiah, yang dihasilkan dari proses peluruhan radioisotop dan dapat menghasilkan partikel α, β, maupun sinar-γ. Radioisotop yang digunakan adalah Cobalt- 60, Cesium-137, Iradium- 192, Radon-255 dan lain-lain.

2.4. Interaksi Radiasi dengan Materi Biologi

Gangguan kesehatan dalam bentuk apapun yang merupakan akibat dari paparan radiasi bermula dari interaksi antara radiasi pengion dalam sel maupun jaringan tubuh manusia. Karena interaksi itu maka sel-sel dapat mengalami perubahan struktur. Sel-sel yang mengalami perubahan struktur tersebut mempunyai kemampuan untuk melakukan proses perbaikan, karena dalam gen sel tersebut

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

mengandung informasi untuk melakukan perbaikan seperti struktur semula (Gabriel, 1996).

Sewaktu proses perbaikan sel tersebut berlangsung, adakalanya dapat terjadi gangguan terhadap keseluruhan metabolisme, sehingga seluruh pembawa informasi perbaikan sel mengalami kerusakan. Jika hal ini terjadi, maka perubahan struktur gen akan mengakibatkan perubahan karakteristik sel dalam fungsi kesatuannya sebagai suatu jaringan. Hal inilah yang kemudian mengakibatkan perubahan fungsi jaringan yang pada akhirnya dapat muncul dalam bentuk gangguan kesehatan terhadap tubuh (Wiryosimin,1995).

Interaksi antara radiasi dengan bahan biologi merupakan proses yang berlangsung secara bertahap. Proses ini diawali dengan tahap fisika dan diakhiri dengan tahap biologi. Ada empat tahapan interaksi, yaitu : (Akhadi, 2000)

1. *Tahap fisika*; berupa absorbsi energi radiasi pengion yang menyebabkan terjadinya eksitasi dan ionisasi pada molekul atau atom penyusun bahan biologi. Proses ini berlangsung sangat singkat dalam orde 10^{-16} detik. Karena sel sebagian besar (70 %) tersusun atas air, maka ionisasi awal yang terjadi di dalam sel adalah terurainya molekul air menjadi ion positif H_2O^+ dan e^- sebagai ion negatif. Proses ionisasi ini dapat ditulis dengan :

$$H_2O + \text{Radiasi pengion} \longrightarrow H_2O + e^-$$

2. *Tahap fisikokimia*; dimana atom molekul yang tereksitasi atau terionisasi mengalami reaksi-rekasi sehingga terbentuk radikal bebas yang tidak stabil. Tahap ini berlangsung dalam orde 10^{-6} detik. Karena sebagian besar tubuh

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

manusia tersusun atas air, maka peranan air sangat besar dalam menentukan hasil akhir dalam tahap fisikokimia ini. Efek langsung radiasi pada molekul atau penyusun tubuh selain air hanya memberikan sumbangan yang kecil bagi akibat biologi akhir dibandingkan dengan efek tak langsungnya melalui media air tersebut. Reaksi kimia yang terjadi dalam tahap kedua interaksi ini adalah:

$$H_2O^{+} \longrightarrow H^{+} + OH^{*}$$

$$H_2O + e^{-} \longrightarrow H_2O^{-}$$

$$H_2O^{-} \longrightarrow OH^{-} + H^{*}$$

Radiasi bebas OH^{*} dapat membentuk *peroksida* (H_2O_2) yang bersifat oksidator kuat melalui reaksi sebagai berikut :

$$OH^{*} + OH^{*} \longrightarrow H_2O_2$$

3. *Tahap kimia* dan *biologi*; berlangsung dalam beberapa detik dan ditandai dengan terjadinya rekasi antara radikal bebas dan peroksida dengan molekul organik sel serta inti sel yang terdiri atas kromoson-kromoson. 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 melakukam reaksi lainnya. Radikal bebas dan peroksida juga dapat merusak struktur biokimia molekul enzim sehingga fungsi enzim terganggu. Kromoson dan molekul DNA di dalamnya juga dapat dipengaruhi oleh radikal bebas dan peroksida sehingga terjadi mutasi genetik.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

4. *Tahap biologis;* yang ditandai dengan terjadinya tanggapan biologis yang bervariasi bergantung pada molekul penting mana yang berekasi 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.

2.5. Efek Biologi Radiasi Pengion

Cobalt-60 sebagai sumber radiasi pengion mempunyai kemampuan merusak jaringan tubuh. Kerusakan jaringan oleh karena radiasi dikenal sebagai efek biologi radiasi pengion, dimana tingkat kerusakan yang terjadi tergantung dosis radiasi yang diserapnya. Ada dua kemungkinan efek biologi yang timbul akibat radiasi pengion, pertama efek yang timbul dianggap sebanding dengan dosis serap dan yang kedua tidak adanya efek bila dosis yang diserap di bawah dosis minimal.

Efek biologi radiasi pengion yang terjadi pada tubuh dapat digolongkan menjadi tiga, yaitu efek somatik non stokastik, efek somatik stokastik dan efek genetik. Ketiga efek tersebut masing-masing mempunyai sifat dan ciri tersendiri (Anonim, 1994).

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

1. Efek Somatik Non Stokastik

Efek somatik non stokastik akan timbul bila dosis yang deterima tubuh melebihi batas ambang. Dalam radioterapi efek somatik non stokastik pada pasien yang mendapat terapi radiasi harus diterima sebagai efek samping yang tidak dapat dihindari. Untuk radiodiagnostik hal tersebut tidak dapat dibenarkan. Tanda-tanda efek somatik non stokastik adalah sebagai berikut : (Rumhady, 1993)

a. Timbul setelah nilai ambang terlampaui.

b. Terjadi dalam waktu tak begitu lama setelah dosis diterima.

c. Makin tinggi dosis radiasi yang diterima, makin berat derajat kelainan yang terjadi.

d. Laju dosis berpengaruh terhadap derajat kelainan yang timbul.

karena ada nilai batas atau ambang yang harus dilampaui sebelum timbulnya efek, maka efek somatik non stokastik disebut juga efek ambang atau *Threshold Effect*.

2. Efek Somatik Stokastik

Efek somatik stokastik merupakan efek tertunda yang diderita seseorang akibat suatu dosis penyinaran yang diterimanya (Anonim,1994).

Efek somatik stokastik sering disebut sebagai efek dosis respon ambang nol yang berarti setiap penambahan radiasi seberapapun kecilnya selalu membawa pertambahan resiko timbulnya efek ini (Cember, 1983).

Tanda-tanda efek radiasi somatik stokastik adalah sebagai berikut : (Rumhady, 1993)

a. Tidak ada dosis ambang untuk timbulnya efek.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

b. Efek terjadi setelah melewati masa tenang bertahun-tahun.

c. Laju dosis tak berpengaruh pada derajat kelainan yang timbul

3. Efek Genetik

Efek biologi radiasi pengion yang timbul pada generasi yang belum lahir dikenal dengan istilah efek genetik (Edwards, 1990). Efek genetik terjadi sebagai akibat rusaknya molekul DNA pada sperma dan ovum akibat radiasi pengion. Apabila mutasi germinal terjadi dan informasi abnormal diteruskan ke generasi selanjutnya, maka informasi tersebut dapat bermanifestasi sebagai suatu penyakit atau malformasi (Wiryosismin, 1995).

Efek radiasi pengion tergantung pada beberapa hal, yaitu energi radiasi pengion dimana semakin rendah energinya maka kerusakan semakin parah, luas lapangan radiasi dimana efek semakin besar bila lapangan semakin luas, dosis radiasi karena setiap jaringan mempunyai dosis toleransi tersendiri dan tingkat sensitifitas jaringan. Untuk mengetahui tingkat sensitifitas jaringan dari yang paling sensitif sampai yang resisten akan dijabarkan satu persatu berikut ini : (Travis,1984)

1. Sistem *Hemopoietik*

Sistem *hemopoietik* terdiri dari sumsum tulang, darah dan limfe. Sumsum tulang ada dua macam yaitu sumsum tulang merah dan sumsum tulang kuning. Sumsum tulang merah lebih berperan dalam penyediaan sel-sel darah dibanding sumsum kuning. Sel darah terdiri dari limfosit, granulosit, trombosit, eritrosit dengan urutan sensitifitas semakin menurun.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Efek radiasi terhadap sumsum tulang yang utama adalah menurunnya jumlah sel darah. Pada dosis rendah akan terjadi penurunan jumlah sel darah dan penyembuhan dalam beberapa minggu, sedangkan dosis tinggi menyebabkan penipisan sel darah dan penyembuhan dalam waktu lama. Efek kronik pada sistem hemopoietik adalah anemia aplastik dan leukemia.

2. Jaringan Reproduksi

   a. Sistem Reproduksi Laki-laki

      Jaringan lunak dari sistem reproduksi laki-laki kecuali testis adalah *radioresisten*. Sensitifitas sistem ini diukur dari sel-sel yang belum matang atau yang aktif membelah. Dosis sedang (500-600 cGy) menyebabkan sterilitas, sedangkan dosis rendah (250 cGy) menyebabkan sterilitas sementara. Secara umum sistem reproduksi laki-laki lebih sensitif dari pada sistem reproduksi wanita.

   b. Sistem reproduksi wanita

      Sel-sel reproduksi wanita pembelahannya tidak konstan karena adanya sistem menstruasi. Dosis yang mengakibatkan sterilitas pada wanita umumnya lebih dari 625 cGy. Dosis penyebab sterilitas pada usia tua lebih rendah dibandingkan usia muda. Kemungkinan kerusakan kromosom yang menghasilkan mutasi dapat diderita oleh pasien yang mendapat terapi radiasi.

3. Jaringan Pencernaan

   Saluran pencernaan terdiri dari mulut, kerongkongan, lambung, usus halus, usus besar dan anus. Seluruh saluran pencernaan ditutupi oleh mukosa yang selnya

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

aktif membelah, sehingga mukosa merupakan bagian yang paling sensitif. Mukosa mulut dan kerongkonga tingkat sensitifitasnya sama dengan kulit. Reaksi yang timbul adalah rasa nyeri dan disfagia. Dosis 1000-2000 cGy menyebabkan mukositis dan *esofagitis*. Dosis sedang dan tinggi menyebabkan membran *mukosa, atrofi, ulserasi, fibrosis* dan *striktur*. Untuk saluran bagian bawah gangguan di atas berupa diare, gangguan *absorbsi, dehidrasi*. Usus halus merupakan bagian yang paling sensitif dari seluruh saluran pencernaan. Dosis sedang dapat mengurangi aktifitas *mitosis* sel-sel *villi*. Dosis tinggi dapat menyebabkan *villi* kehilangan seluruh selnya (*ulserasi, fibrosis dan nekrosis*). Penyinaran pada usus halus sering terjadi akibat terapi radiasi pada *karsinoma ovari* akan tetapi efeknya lambat dan kecil. Dosis 5000-6000 cGy akan menimbulkan *obstruksi*.

4. Kulit

Kulit terdiri dari epidermis, dermis dan subkutan. Dermis mengandung struktur khusus yaitu folikel rambut, kelenjar minyak dan kelenjar keringat. Pada lapisan epidermis terdapat sel matang dan sel yang belum matang. Sel matang secara periodik akan digantikan oleh sel belum matang. Sel belum matang inilah yang menyebabkan kulit sensitif terhadap radiasi. Efek cepat pada dosis sedang atau tinggi akan menyebabkan peradangan tak merata atau eritema. Dosis *eritema* sekitar 1000 cGy. Efek lambat pada kulit berupa *atrofi, fibrosis, pigmentasi, ulserasi, nekrosis* dan kanker akan tampak beberapa tahun setelah penyinaran dengan dosis tinggi. Dalam terapi radiasi dengan dosis total 6000 cGy dalam 6

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

minggu biasanya hanya akan meyebabkan *atrofi* pada daerah yang terkena radiasi (Travis,1984).

5. Tulang

   Dosis radiasi dapat mengurangi aktifitas *fosfoti* tulang dan menyebabkan pertumbuhan tulang terganggu serta *osteoporosis*. Dosis tinggi dapat menyebabkan patah tulang.

6. Otot

   Jaringan otot mengandung serat-serat yang merangsang pergerakan organ atau bagian tubuh. Karena sel-sel jaringan otot sangat khusus dan tidak membelah maka sangat tidak sensitif terhadap radiasi.

7. Jaringan Saraf

   Jaringan saraf terdapat pada otak dan medulla spinalis. Sel saraf tidak membelah sehingga baru dengan dosis 4000 cGy akan menimbulkan mielitis dan degenerasi jaringan otak. Dosis 5000 cGy dapat menyebabkan kematian nukleus sel saraf (Widjaja, 1988).

Pengaruh dosis radiasi dalam radioterapi perlu diperhitungkan. Penyinaran seluruh tubuh dengan dosis di bawah 10 cGy dan 100 cGy untuk sebagian tubuh yang diberikan dalam beberapa hari tidak akan menimbulkan efek somatik non stokastik akan tetapi untuk efek somatik stokastik dan efek genetik dengan dosis yang rendah sekalipun akan mungkin terjadi dan harus diterima.

Pasien yang mendapat radioterapi, kenyataan adanya efek genetik radiasi pengion terhadap tubuh manusia diabaikan mengingat keuntungan yang diperoleh.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Hal lain yang perlu diperhatikan adalah tidak terlampauinya dosis toleransi organ atau jaringan sehat di sekitar tumor. Berikut tabel klasifikasi dosis toleransi organ:

Tabel 2.1 Klasifikasi dosis toleransi organ (Travis, 1984)

Dosis Total (cGy)	Organ yang mengalami komplikasi
Rendah: 1000 - 2000	Gonad: Ovarium dan testis Organ yang tumbuh: Payudara, sumsum tulang dan kartilago. Lensa
Sedang: 2000 - 4500	Lambung, usus halus, colon Liver (3500 – 4500) Ginjal, Paru (> 2500) Jantung (> 4500) Tyroid dan glandula pituitary otot yang sedang tumbuh. Kelenjar limfe
Tinggi: 5000 - 7000	Struktur epitel (kulit) Cavum oris, esophagus, rectum, pancreas, glandula salivaria, vesica urinaria. Tulang dan cartilago CNS (Otak dan medulla spinalis).
Sangat Tinggi: > 7500	Ureter, Vagina, Uretra Payudara Otot, darah, ductus billiaris.

Dalam rencana terapi perlu memperhatikan sensitifitas pada beberapa organ. Seringkali lapangan radiasi dari berkas kolimator mengenai organ–organ lain yang sebetulnya tidak diinginkan seperti pada terapi radiasi *karsinoma nasopharing* dimana mukosa mulut masuk dalam lapangan kolimator yang bentuknya segi empat.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Untuk itu sistem proteksi yang tepat sangat dibutuhkan. Berikut ini pembahasan efek radiasi pada beberapa organ: (Marthin, 1992).

1. Mata

   Mata mempunyai bagian yang sensitif terhadap radiasi yaitu konjuntiva dan kornea. Sedang lensa mata masuk sangat radiosensitif. Lensa mata mengandung sel-sel yang aktif membela dan bila terkena radiasi akan mengalami kerusakan tanpa ada mekanisme regenerasi dan kerusakannya dalam bentuk katarak. Bila dosis lebih dari 700 cGy peluang katarak menjadi 100 %. Kerusakan minimal pada dosis 200 cGy adalah penglihatan menjadi kabur. Dosis kronis memberikan efek kerusakan yang lebih rendah dibandingkan dosis akut. Pada dosis akut 400 cGy menimbulkan katarak, sedangkan untuk dosis dengan fraksinasi diperlukan dosis total 1200 – 1400 cGy.

2. Sistem Pernapasan

   Sistem pernapasan terdiri dari hidung, pharing, trakea dan paru yang relatif resisten terhadap radiasi. Dosis tinggi (>1000 cGy) akan memberikan respon yang nyata pada paru yakni pneumonitis yang berlanjut menjadi phibrosis dan dapat menimbulkan kematian. Dosis total 2500 cGy peluang terjadinya phibrosis 8 % sedangkan untuk dosis total 3000 cGy akan meningkat menjadi 30 % (Travis, 1984).

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.6. Terapi Radiasi Eksternal pada Penyakit Keganasan

Dilihat dari proses berlangsungnya, ada dua jenis penyinaran terhadap jaringan tubuh, yaitu: (Akhadi, 2000)

1. Penyinaran dalam waktu singkat (*akut*) yang umumnya terjadi pada kecelakaan. Penyinaran akut yang melibatkan radiasi dosis tinggi dapat menimbulkan *efek biologi seketika,* yaitu efek yang kemunculannya kurang dari satu tahun sejak terjadinya penyinaran. Namun penyinaran akut dapat pula menimbulkan efek biologi tertunda apabila dosis radiasinya tidak tinggi.
2. Penyinaran oleh dosis rendah namun berlangsung terus menerus *(kronis).* Penyinaran jenis ini biasanya tidak segera menampakkan efeknya, sehingga efek yang ditimbulkannya disebut *efek tertunda.* Efek ini dapat muncul setelah beberapa tahun bahkan puluhan tahun dari saat terjadinya penyinaran.

Karsinoma nasofaring dan *karsinoma serviks uteri* merupakan kasus terbanyak dalam terapi radiasi.

2.6.1. Karsinoma nasopharing

Nasofaring menempati tempat yang sulit untuk diobati dan sering tak terdeteksi bila terjadi keganasan. Pengobatan dengan radioterapi dianggap lebih menguntungkan daripada pembedahan. Penyebaran tumor ini ada tiga yaitu pertama penyebaran lokal, terjadi *infiltrasi* kejaringan *nasofaring* dan kedasar tengkorak, kedua penyebaran limpatik, terjadi *infiltrasi* ke kelenjar limfe servikal dan sering kali

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

bilateral, ketiga penyebaran hematogen, terjadi *metastase* ke hati, paru, limfe dan tulang.

Terapi radiasi eksterna pada *karsinoma nasofaring* mempunyai lima tahapan yaitu :

1. Stadium awal

   Penyinaran daerah *nasofaring* dan leher bagian atas (lapangan I dan II) dimana pada batas *kranial* meliputi basis kranii fossa serebri media, batas *anterior* meliputi depan koanae tepat dibelakang bola mata, batas *kaudal* setinggi tepi atas kartilago tiroideus, dan batas *posterior* berada dibelakang meatus akustikus eksternus. Dosis cGy perhari dalam lima kali seminggu dan setelah mencapai dosis total 4000 cGy lapangan diperkecil batas *kranial* tepat dibawa sella tursika, batas *kaudal* angulus mandibula dan batas *anterior posterior* tetap.

   Penyinaran daerah leher bawah dan *supraclavikula* (lapangan III dan IV) terdiri atas dua cara yaitu pertama satu lapangan langsung dari *anterior* dengan bagian tengah diblok untuk melindungi daerah esophagus dan trakhea, kedua dua lapangan langsung (*dekstra dan sinistra*) dengan jarak antara keduanya selebar trakhea. Dosis 2000 cGy perhari dalam lima kali seminggu dengan dosis total 4000 cGy.

2. Pada tumor yang lebih besar (T_{3-4} Mo)

   Setelah mencapai dosis total 4000 cGy untuk lapangan I dan II tidak dirubah dan penyinaran diteruskan sampai 6000 cGy.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

3. Pada tumor yang lebih besar dan sudah ada pembesaran pada pembesaran pada kelenjar limfe dan *supraclavikula*

   Lapangan sama seperti pada poin 2 dengan dosis total lapangan I dan II maupun lapangan III dan IV adalah sama (6000 cGy). Dosis diberikan dalam dua tahap (*split dose*). Pertama dosis total 4000 cGy dalam 4 minggu dan istirahat 3 minggu, kedua dosis total dilanjutkan sampai 6000 cGy dalam dua minggu. Bila terjadi residu dapat diberikan booster 3 x 200 cGy dengan lapangan terbatas pada residu.

4. Bila proses *infiltrasi* sampai ke rongga hidung atau sinus maksillaris dan sinus ethmoidalis.

   Lapangan ditambah dari anterior dan teknik filter wedge untuk lapangan dari samping *dekstra* dan *sinistra.*

5. Bila kelenjar leher sangat besar atau beruntun dari leher atas sampai bawah.

   Penyinaran dengan lapangan besar dari *dekstra* dan *sinistra* untuk *nasofaring* dan leher bawah. Untuk daerah *supraclavikula* hanya dengan lapangan *anterior* (Anonim, 1998).

2.6.2. Karsinoma Serviks Uteri

Karsinoma serviks uteri menempati persenrase yang tinggi dalam kasus penyakit keganasan pada wanita. Penyebaran tumor ini ada tiga yaitu pertama penyebaran lokal, terjadi *infiltrasi* ke parametrium, korpus uteri, vagina, rektum dan vesika urinaria.. Kedua yaitu penyebaran limfatik dimana terjadi *infiltrasi* ke kelenjar

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

limfe obturatorium, iliaka, sakrum dan para aortik. Ketiga penyebaran yang hematogen dimana terjadi *metastase* ke hati, paru dan tulang.

Teknik terapi radiasi eksterna untuk *karsinoma serviks uteri* mempunyai jumlah lapangan radiasi minimal dua lapangan yaitu lapangan plan paralel *anterior* dan plan paralel *posterior*. Jika teknik memungkinkan dianjurkan empat lapangan dengan penambahan dua lapangan dari *dekstra* dan *sinistra*. Batas-batas lapangan ada tiga yaitu pertama batas *kranial* adalah bagian bawah vertebra lumbal empat, kedua batas *kaudal* adalah bagian bawah simpisis pubis atau bila ada *infiltrasi* di vagina minimal 2 cm distal dari lesi yang teraba, ketiga batas *lateral* adalah minimal 2 cm dari tepi medial tulang panggul.

Dosis total 4000 – 5000 cGy dengan fraksinasi untuk sistem plan paralel adalah 180-200 cGy perhari. Dosis diberikan seminggu lima kali. Untuk pasien yang telah mendapat radiasi *intrakaviter* perlu pengeblokan pada bagian yang telah diradiasi *intrakaviter*. Blok diterapkan setelah dosis total mencapai 2000 cGy (Martin, 1995).

2.7. Prinsip Dasar Proteksi Radiasi

Bahaya radiasi dari sumber-sumber eksternal dapat dikendalikan dengan tiga prinsip dasar proteksi radiasi yaitu pengaturan waktu, pengaturan jarak dan penggunaan perisai (Gabriel, 1996).

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.7.1. Pengaturan waktu

Semakin lama seseorang berada pada medan radiasi maka semakin besar dosis yang diterima.

Dosis radiasi yang diterima pekerja selama berada dimedan radiasi dirumuskan : (Anonim, 1994)

$$D_t = Do \cdot t \quad \text{.....} \quad (2.2)$$

dengan ;

D_t = dosis yang diterima (Gray)

Do = laju dosis mula-mula (Gray/menit)

t = waktu (menit)

2.7.2. Pengaturan Jarak

Paparan radiasi yang berkurang dengan bertambahnya jarak dari sumber radiasi. Karena laju dosis proporsional dengan fluk maka laju dosispun mengikuti hukum kuadrat terbalik. Faktor jarak berkaitan dengan fluks radiasi (Anonim, 1994).

$$D_r = k \frac{1}{r^2} \quad \text{.....} \quad (2.3)$$

dengan :

D_r = laju dosis (Gray)

r = faktor jarak (meter)

k = tetapan yang besarnya bergantung pada sumber

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.7.3. Perisai

Sifat dari bahan perisai yang digunakan harus mampu menyerap energi radiasi (partikel-β dan neutron) atau melemahkan intensitas radiasi (sinar-X dan sinar-γ). Mengingat sifat serap bahan perisai terhadap berbagai jenis radiasi dan energi radiasi yang berbeda jumlah dan jenis bahan penahan radiasi yang diperlukan bergantung pada jenis dan energi radiasi yang dipancarkan sumber. Perisai untuk sinar-X dan sinar-γ berbeda dengan perisai partikel-β (Wiryosimin, 1995).

Attenuasi radiasi γ secara kualitatif berbeda dengan attenuasi radiasi α dan β. Kedua partikel ini mempunyai jangkauan tertentu sehingga dapat diserap seluruhnya dalam medium yang dilalui, sebaliknya radiasi γ hanya dapat dikurangi intensitasnya bila pelindung dipertebal. Faktor transmisi untuk berbagai jenis bahan pelindung dapat dihitung dengan rumus : (Anonim, 1994)

$$I = Io \cdot e^{-\mu x} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.4)$$

dengan :

Io = intensitas mula-mula (W/m^2)

I = intensitas setelah menembus perisai (W/m^2)

x = tebal perisai (m)

μ = koefisien absorbsi linier bahan perisai (m^{-1})

Transmisi primer adalah pengukuran persentase radiasi primer yang melewati materi/bahan. Idealnya sebuah bahan penahan terhadap radiasi primer 100 %. Untuk mengukur transmisi primer dilakukan dengan dua pengukuran, yang

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

pertama dilakukan dengan meletakkan detektor setelah materi/bahan untuk mengetahui intensitas radiasi yang melewatinya dan pengukuran kedua dilakukan dengan detektor diletakkan di bawah penahan untuk mengetahui intensitas yang sampai ke detektor dengan tanpa penahan. Rasio sederhana dari intensitas dengan penahan terhadap intensitas tanpa penahan memberi nilai transmisi yang kemudian dikalikan 100 untuk memberikan persentase.

$$Tp = \frac{Ip}{I'p} \times 100\ \% \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.5)$$

dengan ; Tp = transmisi primer dalam %, Ip = intensitas dengan penahan, $I'p$ = intensitas tanpa penahan (Curry, 1984).

Laju dosis radiasi sinar-γ berbanding lurus dengan intensitas radiasinya, seperti persamaan: (Anonim, 1994)

$$Dx = Do \cdot e^{-\mu x} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.6)$$

dengan :

Dx = laju dosis setelah menembus bahan (Gy)

Do = laju dosis sebelum menembus bahan (Gy)

μ = koefisien absorbsi linier bahan perisai (cm^{-1})

x = tebal perisai (cm)

Pada HVL = x

$$Dx = \frac{1}{2} Do$$

sehingga rumus ;

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

$$Dx = Do\ e^{-\mu x} \text{ dapat ditulis menjadi}$$

$$\frac{1}{2}\ Do = Do\ e^{-\mu\,(HVL)}$$

$$e^{-\mu\,(HVL)} = \ln \frac{1}{2}$$

$$HVL = \frac{0{,}693}{\mu}$$

Rumus tersebut dapat ditulis menjadi :

$$Dx = Do\ e^{-\frac{(0{,}693.x)}{HVL}}$$

$$Dx = Do\ e^{-0{,}693\frac{x}{HVL}}$$

$$Dx = Do\left(\tfrac{1}{2}\right)^{\left(\frac{x}{HVL}\right)}$$

$$Dx = \frac{Do}{2^{\frac{x}{HVL}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.7)$$

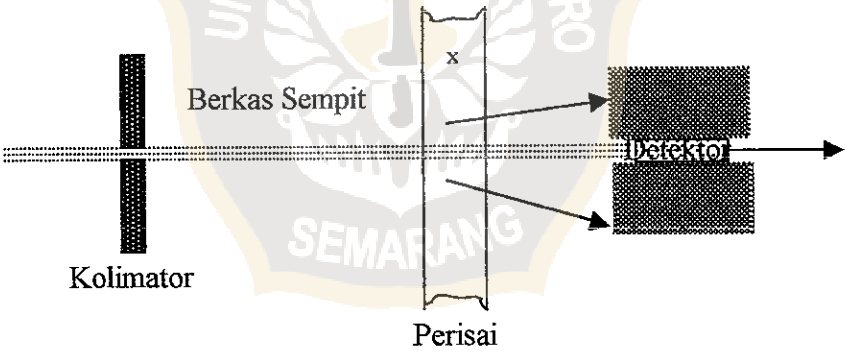
2.8. Blok Penahan Radiasi pada Terapi Radiasi Eksternal

Penahan radiasi disamping dimanfaatkan dalam proteksi ruang penyinaran, juga diterapkan pada sistem proteksi bagi pasien yang mendapat terapi radiasi. Sistem proteksi tersebut berupa pemberian bahan penahan radiasi yang disebut blok penahan radiasi (*Shielding Block*). Tujuannya adalah untuk mengurangi dosis yang diterima oleh jaringan yang diblok. Jaringan yang di blok adalah jaringan sensitif yang berada dalam lapangan berkas kolimator dan bukan termasuk volume tumor. Bahan blok yang digunakan pada pesawat teleterapi Cobalt-60 terbuat dari timbal (Pb) dengan

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

ketebalan 5 HVL *(Half Value Layer)* dengan nilai transmisi bahan kurang lebih 3 % dan mampu mengattenuasi sinar primer sampai sekitar 97 % (Djarwani, 1988). Dengan nilai transmisi yang kecil diharapkan dosis yang sampai pada organ yang di blok masih di bawah dosis toleransi, sehingga dapat mencegah kerusakan yang menetap (Barnes, 1999).

Penggunaan penahan radiasi yang ditempatkan diantara sumber radiasi dan manusia adalah suatu cara melindungi seseorang terhadap penerimaan dosis yang berlebihan terutama dalam bentuk radiasi . Prinsip perisai radiasi adalah mengurangi fluks radiasi. Penahan yang baik adalah yang dapat mengurangi radiasi yang sangat efektif. (Wiryosimin, 1995). Seperti pada gambar diagram eksperimen perisai radiasi dibawah ini:



Gambar 2.4 Diagram eksperimen perisai radiasi (Wiryosimin, 1995)

Pada sumber radiasi yang besar penggunaan perisai radiasi sangat diperlukan. Perisai perlu dirancang sedemikian rupa sehingga paparan yang diterima tidak melebihi batas maksimum yang telah ditentukan. Sebaliknya dengan segi

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

kepraktisan dan ekonomi, perisai juga tidak boleh terlalu besar sehingga terlalu berat dan mahal. Perisai yang baik harus dirancang dengan akurat sesuai dengan keperluan, sehingga tebalnya tidak berlebihan tetapi cukup untuk melindungi daerah radiasi (Shapiro, 1981).

Perlindungan terhadap organ vital dalam daerah radiasi adalah salah satu perhatian utama dalam radioterapi. Dosis yang diberikan pada organ vital hendaknya tidak saja melebihi batas toleransi, namun juga dosis pada jaringan normal haruslah seminimal mungkin, sejauh volume target diikutsertakan, dengan batasan yang mencukupi yaitu tumor serta daerah penyebarannya.

Blok pelindung biasanya terbuat dari timbal (Pb), ketebalan yang dibutuhkan untuk memberikan perlindungan pada daerah yang perlu dilindungi tergantung dari kualitas sinar yang dapat menembus blok tersebut. Transmisi sinar primer sebesar 5% melalui blok tersebut dapat diterima jika *n* adalah tingkat/jumlah HVL yang hendak dicapai dari transmisi ; (Khan, 1994)

$$\frac{1}{2^n} = 0{,}05$$

$$2^n = \frac{1}{0{,}05} = 20$$

$$n \log 2 = \log 20$$

$$n = \frac{\log 20}{\log 2} = 4{,}32.$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

maka ketebalan timbal antara 4,5-5,0 HVL akan memberikan kurang dari 5% transmisi sinar primer, sehingga direkomendasikan untuk sebagian besar *shielding klinis*. Blok timbal tersebut ditempatkan di atas pasien dengan penyangga baki yang terbuat dari plastik tebus pandang yang disebut *shadow tray*. Rekomendasi ketebalan *shield timbal* untuk kualitas sinar yang berbeda-beda dapat dilihat pada lampiran 4.

Dalam rencana terapi perlu memperhatikan sensitifitas pada beberapa organ. Seringkali lapangan radiasi dari berkas kolimator mengenai organ-organ lain yang sebetulnya tidak diinginkan. Seperti pada terapi radiasi *karsinoma nasofaring* dimana mukosa mulut masuk dalam lapangan kolimator yang bentuknya segi empat.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)