ISSN : 0854 - 2910

STRUKTUR DAN SEGI-SEGI KESELAMATAN LINAC MEDIK

Arismunandar, Silakhuddin
Pusat Pengembangan Sistem Reaktor Maju – Batan

ABSTRAK

STRUKTUR DAN SEGI-SEGI KESELAMATAN LINAC MEDIK. Telah dikaji tentang struktur pesawat Linac untuk medik dan segi-segi keselamatannya. Struktur utama dari pesawat Linac terdiri atas *electron gun*, struktur pemercepat, sistem pembelok, unit tanduk tritmen (*treatment head*), sistem gelombang mikro dan sistem vakum. Segi-segi keselamatannya terdiri atas keselamatan radiasi dan non radiasi. Segi keselamatan non radiasi terdiri atas bahaya-bahaya tegangan tinggi listrik, komponen-komponen berat, tekanan tinggi gas freon, panas dan timbulnya gas ozon. Sumber daya manusia setempat dapat menangani segi-segi keselamatan tersebut.

ABSTRACT

STRUCTURE AND SAFETY ASPECTS OF MEDICAL LINAC. *Structure and safety aspects of medical Linac has been assessed. The main structure of Linac consist of electron gun, accelerating structure, deflection system, treatment head unit, microwave system and vacuum system. The safety aspects consists of radiation safety and non radiation safety. The non radiation safety are electrical high voltage, heavy components, high pressure of freon gas, thermal and ozon gas hazards. The local human resources capabilities will be abble to handle those safety aspects.*

 ISSN : 0854 - 2910

PENDAHULUAN

Linac adalah salah satu alat pemercepat elektron secara linear berenergi tinggi, dalam kisaran MeV. Pesawat yang digunakan untuk keperluan terapi penyinaran dapat menghasilkan 2 jenis radiasi , yaitu berkas elektron dan berkas foton sinar-x . Berkas elektron digunakan untuk penyinaran tumor yang berada di permukaan seperti payudara, kulit, kepala dan leher, sedangkan berkas foton digunakan untuk penyinaran jaringan tumor yang jauh dari permukaan misalnya otak, hati , rahim dan paru-paru [1].

Pada umumnya Linac dilengkapi dengan berbagai variasi energi walaupun ada juga jenis Linac yang mempunyai energi tunggal.

Ribuan mesin Linac saat ini terinstal di rumah-rumah sakit diseluruh dunia. Di Indonesia Linac terpasang dikota-kota : Jakarta (4 rumah sakit), Semarang dan urabaya. Penggunaan Linac di rumah-rumah sakit di Indonesia cukup efektif yang mana puluhan pasien penderita tumor perhari diterapi. Sejak dioperasikannya pesawat linac di RSCM setiap tahunnya sebanyak 60 pasien telah diterapi , dan di RS Kanker Dharmais setiap tahunnya sebanyak 80 pasien. Terapi dengan Linac yang umumnya menggunakan foton (sinar-x) [2]. Radio terapi disajikan dengan sinar-x yang dihasilkan oleh tumbukan berkas elektron pada target atau langsung dengan berkas elektron yang didifusikan dengan hamburan atau *scanning magnet* (mode elektron).

Tulisan ini dilakukan untuk mengkaji segi keselamatan penggunaan linac medik terhadap resiko penggunaan dan kesalahan pengoperasian. Kesalahan penggunaan dan pengoperasian mengandung resiko radiasi , kelistrikan tegangan tinggi dan bahaya mekanik lainnya. Tulisan ini merupakan hasil kajian terhadap beberapa dokumen Linac dan tinjauan lapangan terhadap fasilitas-fasilitas Linac di rumah-rumah sakit di Jakarta. Hasil kajian dimaksudkan agar dapat diperoleh bahan-bahan awal bagi teknologi instalasi Linac.

KOMPONEN UMUM LINAC MEDIK

Ada dua konfigurasi dasar linac digunakan yaitu berkas lurus dan berkas membelok. Di dalam Linac berkas lurus, komponen-komponen linac seperti *electron gun* dan target harus tersusun rapat *(compact)*. Serta terinstal dalam rangka kepala sinar-x berbentuk tanduk *(x-ray head)* dengan ruangan sangat terbatas. Linac dengan berkas membelok umumnya menggunakan magnet pembelok *akhromatik* 270° yang terletak pada rangka kepala tanduk sinar-x. Dalam hal ini pembatasan pada ukuran fisik dari

peralatan akselerator sangat longgar. Akselerator terinstal secara horizontal, baik dalam suatu gantri (kerangka peluncur) yang berputar atau dalam suatu rumah statik yang terpisah. Dalam hal yang terakhir, suatu sistem transport digunakan untuk membawa berkas elektron ke tanduk sinar-x .

Pendekatan desain untuk peralatan akselerator ditentukan oleh energi berkas maksimum, spesifikasi mode-mode foton dan elektron. Spesifikasi Linac yang umumnya dipakai di klinik-klinik terapi kanker adalah Linac yang menghasilkan energi elektron sekitar 10 MeV dengan dosis 2-3 Gray untuk penampang 15 x 15 cm yang terukur pada 100 cm SSD.

Instalasi Umum Linac Secara garis besar ditunjukan pada Gambar.1 dengan komponen-komponen utama Linac zarah elektron untuk keperluan medik terdiri dari[1,2]:

1. *Electron Gun*

Electron gun membangkitkan berkas elektron dengan arus hingga kira-kira 500 mA pada tegangan 15 kV. Komponennya terutama terdiri atas katoda pemancar elektron yang dipanasi secara tak langsung, sistem ekstraksi untuk mengeluarkan berkas elektron dan suatu slit (celah) untuk mengatur intensitas berkas elektron yang dikeluarkan. Komponen ini umumnya dioperasikan pada kevakuman 10^{-6} mmHG atau lebih rendah lagi. Jika kevakuman kurang, emisi berkas elektron dari katoda akan berkurang dan katoda bisa rusak.

Laju emisi elektron dikendalikan oleh adanya grid (kisi) jaringan yang terpasang di dekat bagian permukaan katoda. Ketika *Electron Gun* dalam kondisi "siap" (*standby*), grid (kisi) diberi tegangan bias negatif terhadap katoda, ini akan menghentikan aliran elektron. Untuk mengemisikan berkas elektron keluar, grid diberi tegangan pulsa positif yang mana frekuensi pulsanya disesuaikan dengan frekuensi gelombang mikro pada struktur pemercepat.

2. Sistem Pemercepat dan Pembelok Berkas Elektron

Struktur Pemercepat

Komponen ini berfungsi mempercepat berkas elektron yang diinjeksikan oleh *electron gun* hingga diperoleh energi yang cukup untuk diarahkan untuk keperluan terapi. Strukturnya berupa tabung silinder yang berisi sel-sel saling berangkai secara seri, setiap sel berupa rongga dan gelang. Ke dalam tabung ini diinjeksikan gelombang mikro yang selanjutnya terbentuk gelombang berdiri (*standing wave*) di dalamnya.

Struktur pemercepat didesain dan dioperasikan sedemikian rupa sehingga medan listrik gelombang mikro sepanjang sumbu sangat kuat dan hampir nol pada luar sumbu. Arah medan listriknya sejajar dengan sumbu struktur, dan arahnya saling berlawanan pada satu sel dengan sel tetangganya (berbeda fase 180^0). Besarnya intensitas medan listrik bervariasi secara sinus pada frekuensi gelombang mikro. Jadi, medan dalam suatu sel akan bervariasi waktu dari suatu harga besar ke nol dan tertuju ke satu arah kemudian balik ke harga besar yang sama tetapi tertuju ke arah sebaliknya, demikian seterusnya.

Berkas elektron dari *electron gun* diinjeksikan untuk mula pertama ke struktur ini ketika medan listrik pada sel pertama terarah ke depan. Sedangkan manakala medan pada sel pertama ini berbalik arah, tak ada berkas elektron yang terinjeksikan. Berkas elektron yang telah terinjeksikan ke dalam sel pertama akan mengalami percepatan di antara dua gelang di dalam sel pertama tersebut. Ketika masuk ke sel kedua, arah medan listrik di sel kedua ini sudah berbalik ke arah maju sehingga berkas elektron akan dipercepat lagi (ketika medan listrik di sel pertama ke arah maju, medan listrik di sel kedua ke arah mundur). Percepatan bertingkat ini akan berlangsung terus hingga sampai sel terujung sehingga diperoleh kumulasi energi maksimum. Adanya beda fase yang saling berlawanan di antara sel-sel yang bertetangga ini menyebabkan berkas elektron akan terpisahkan oleh siklus gelombang mikro dan membentuk berkas yang bergerombol-gerombol (*bunched beams*).

Jarak di antara sel-sel yang bertetangga bervariasi untuk menjaga sinkronisme di antara gerombol berkas elektron dan medan listrik. Dalam hal ini, karena semakin lama kecepatan gerombol berkas semakin besar maka diperlukan waktu lewat di dalam sel lebih panjang agar pada waktu berkas mencapai ujung suatu sel, medan listrik pada sel berikutnya sudah ke arah maju. Sinkronisme ini dibuat dengan membuat panjang sel juga semakin besar untuk sel yang lebih ke depan.

Sistem Pembelokan Berkas

Setelah pemercepatan, berkas elektron dibelokkan sebesar 270^0 di dalam *beam duct* oleh pengaruh medan magnet pembelok. Berkas kemudian ke atmosfer dalam peralatan *threatment head* melalui jendela berkas. Jendela ini terbuat dari foil metal ringan yang tipis untuk meminimalkan kehilangan energi berkas elektron.

ISSN : 0854 - 2910

3. Peralatan Tanduk Tritmen (*Treatment Head*)

Peralatan ini mengubah berkas elektron menjadi bentuk yang cocok untuk disajikan dan memantau dosis keluaran. Peralatan ini terdiri atas komponen-komponen: target yang mengubah berkas elektron menjadi sinar x, suatu filter perata sinar x, kamar monitor dosis untuk memonitor dosis keluaran dan suatu kolimator untuk mengatur medan radiasi sinar x.

Unit ini juga dibuat sedemikian rupa agar berkas elektron atau sinar-x dapat didistribusikan untuk unit tritmen serta dapat diatur dosis dan energi berkasnya sesuai dengan keperluan.

4. Sistem *Microwave* (Sistem Gelombang Mikro)

Sistem ini membangkitkan dan memasok gelombang mikro daya tinggi ke dalam struktur pemercepat. Komponen-komponennya terdiri atas: suatu tabung magnetron, suatu konverter mode *round/rectangular, corner waveguide, sirkulator, variable reactance, dummy load, directional copler, RF window* dan sistem gas SF6.

5. Sistem Vakum

Sistem vakum mengosongkan sistem pemercepat berkas elektron dan sistem pembelok hingga terbebas dari ion-ion atau partikel-partikel lain yang tidak diinginkan. Suatu sistem vakum diperlukan untuk mengisap gas dan menjaga kevakuman agar dapat berlangsung pembangkitan dan pemercepatan berkas elektron dalam pesawat Linac. Bagian-bagian yang divakumkan oleh sistem ini adalah: *wave guide, electron gun,* struktur pemercepat dan *beam duct.* Suatu pompa rotari digunakan untuk mengisap gas dari tekanan atmosfer ke kevakuman hingga kira-kira 10^{-2} mmHg, dan suatu pompa ion digunakan untuk memvakumkan dari 10^{-2} mmHg hingga kira-kira 10^{-7} mmHG atau lebih.

6. Sistem Pendingin

Pesawat Linac harus didinginkan karena beberapa komponen membangkitkan panas. Struktur pemercepatan harus dijaga pada temperatur tertentu karena karakteristiknya berubah sesuai sesuai dengan perubahan temperatur. Untuk itu diperlukan sistem pendingin air terkendali yang terdiri atas sistem primer dan sistem sekunder. Sistem primer akan mendinginkan secara langsung pada komponen-komponen Linac dan sistem sekunder akan mendinginkan sistem primer.

ISSN : 0854

Aliran air pendingin primer dalam besaran kurang lebih 10 l/menit akan dialirkan ke struktur pemercepat selanjutnya tercabang ke cabang A dan B. Cabang A dengan debit kira-kira 4 l/menit akan mendinginkan secara seri ke komponen-komponen: target, *beam duct*, magnet pembelok dan sirkulator. Cabang B dengan debit 6 l/menit akan mengaliri secara seri komponen-komponen generator *micro-wave* yaitu: *frc cavity, magnetron, rf window dan dummy load.*

7. Modulator Pulsa (termasuk unit penggerak thyratron dan unit pengatur)

Modulator pulsa memberikan pulsa-pulsa energi tinggi dan pulsa tegangan tinggi kepada magnetron dan elektron gun.

8. Sistem Penggerak Unit Perawatan

Sistem ini menyangga *gantry* dari unit perawatan dan memutarnya manakala perlu. Sistem penggerak ini terdiri dari mekanisme pemutar gantri dan sistem pemasok daya untuk mekanisme penggerak tersebut.

9. Unit Pengatur

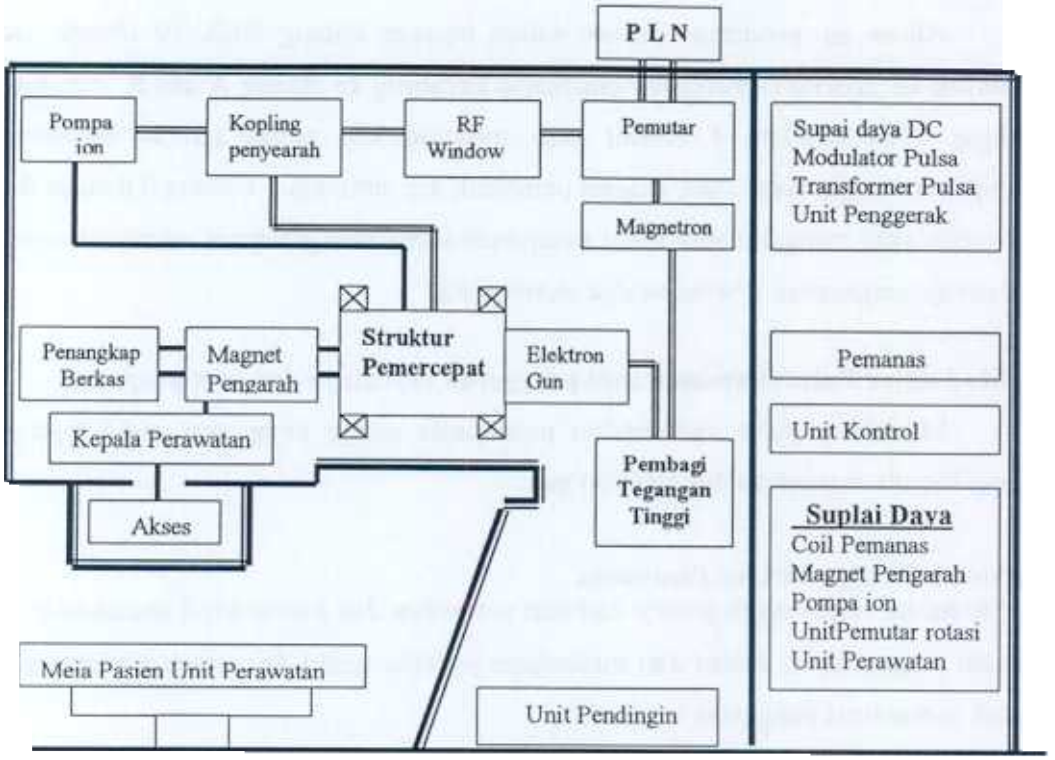
Unit pengatur berperan hampir semua fungsi pengoperasian dan pengendalian terkecuali untuk pengatur posisi pasien pada ruang perawatan.

10. Lengan penggantung (pendant)

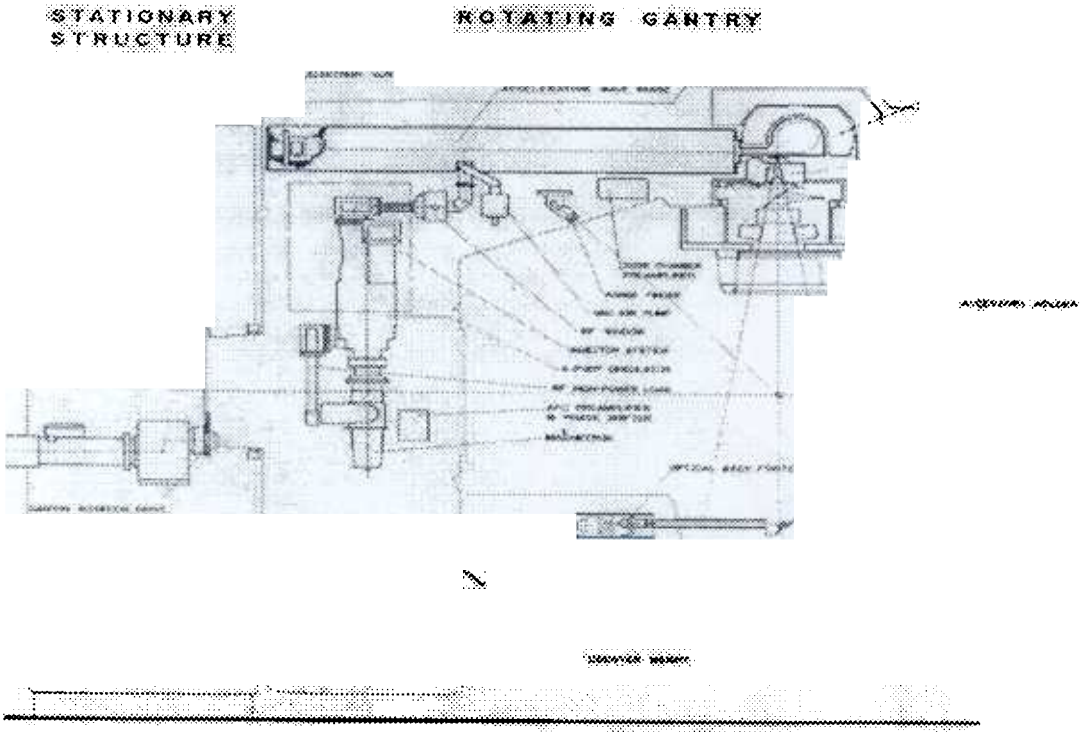
Unit ini digunakan untuk memposisikan pasien pada unit meja perawatan.

Konstruksi linac secara garis besar dapat dilihat pada gambar 1 dan gambar 2.

ISSN : 0854 - 2910



Gambar Diagram Blok Linac



Gambar 2. Komponen Utama Linac untuk kedokteran * *Mitsubishi ML-6M*

SPESIFIKASI BEBERAPA LINAC

Spesifikasi Linac yang umumnya dipakai di klinik-klinik terapi kanker adalah Linac yang menghasilkan energi elektron sekitar 10 MeV dengan dosis 2-3 Gray untuk penampang 15 x 15 cm yang terukur pada 100 cm SSD.

Telah dilakukan pengkajian terhadap spesifikasi Linac yang digunakan di rumah-rumah sakit untuk terapui kanker. Beberapa tipe Linac telah dikaji yaitu :

1. Mitsubishi ML-6M di RS Supadiyo Semarang
   Energi sinar-x : 6 Mv dengan dosis : 0,6-3,0 Gy/menit (60-300 rad/menit)
   Energi berkas elektron : 6 MeV dengan dosis : 2,0 – 10 Gy/ menit (200 – 1000 rad/menit)
   Mevatron 74 pernah terpasang di RSCM
   Energi sinar-x : 10 MV dengan dosis : 1-3,0 Gy/menit (60-300 rad/menit)
   Energi berkas elektron : 12 MeV dengan dosis : 3 Gy/ menit (200 – 1000 rad/menit)
3 Neptum
   Energi sinar-x : 9 MV dengan dosis : 3,0 Gy/menit (60-300 rad/menit)
   Energi berkas elektron : 10 MeV dengan dosis : 3 Gy/ menit (200 – 1000 rad/menit)
4. Mitsubishi EXL-14 di RS Kanker Dharmais
   Energi sinar-x : 6 MV dengan dosis : 0,6-3,0 Gy/menit (60-300 rad/menit)
   Energi berkas elektron : 6 ; 9 ; 12 MeV dengan dosis : 2,0 – 10 Gy/ menit (200 – 1000 rad/menit)
5 Varian Clinac 2100 di RSCM
   Energi sinar-x : 6 dan 10 MV dengan dosis : 0,6-3,0 Gy/menit (60-300 rad/menit)
   Energi berkas elektron : 6 ; 9 ; 12 ; 16 ; 20 MeV dengan dosis : 2,0 – 10 Gy/ menit

BAHAYA YANG DAPAT TERJADI PADA PESAWAT LINAC [4,5)]

Sistem keselamatan dari suatu fasilitas Linac dapat dibagi dalam keselamatan personel dan keselamatan alat. Untuk menjalankan fungsi keselamatan, suatu sistem perangkat keras *interlock* dipasang pada sistem alat dan fasilitas infrastruktur. Berikut suatu tinjauan pada sistem keselamatan personel yang berkaitan dengan pengoperasian pesawat Linac.

Bahaya-bahaya yang dapat timbul pada operasi Linac dapat diklasifikasi ke dalam 3 jenis yaitu : bahaya radiasi, bahaya kelistrikan, bahaya mekanik bahaya panas dan bahaya timbulnya gas ozon.

1. Bahaya Radiasi

Suatu pesawat Linac hanya memancarkan radiasi primer dalam bentuk sinar-x dan berkas elektron yang tidak menimbulkan radiasi sekunder. Radiasi primer tersebut hanya terjadi selama pesawat Linac diopoerasikan. Jadi suatu fasilitas Linac medik dapat digolongkan dalam fasilitas radiasi kelas II. Sekalipun demikian untuk Linac dengan energi sinar-x tinggi mungkin bisa menyebabkan adanya radiasi residu pada beberapa komponen seperti pada sistem dosimetri dan filter perata sinar-x. Pengalaman kecelakaan yang terjadi adalah suatu paparan radiasi pada pasien yang berlebihan karena tidak termonitornya dengan baik intensitas radiasi.

Bahaya radiasi dapat timbul di dalam dan di sekitar pesawat Linac sekalipun sistem Linac tidak sedang dioperasikan seperti sewaktu testing suatu subsistem sedang dilakukan. Misalnya bila sistem generator gelombang mikro dihidupkan maka tabung magnetron yang dioperasikan dengan daya tinggi dapat menghasilkan sinar-x. Di dalam struktur pemercepat juga dapat timbul adanya "arus gelap" (*dark currents*) sekalipun electron gun tidak beroperasi.

2. Bahaya Kelistrikan

Pesawat Linac mengandung beberapa komponen yang dioperasikan pada tegangan tinggi. Pompa vakum jenis ionik mungkin bisa terpasang tegangan hingga 7 kV, termasuk juga di dalam *power supply* nya dan kabel-kabel penghubung keduanya. Generator gelombang mikro beroperasi pada tegangan hingga 45 kV untuk mencatu anoda dari magnetron. Gelombang mikro daya tinggi dapat membahayakan retina mata manakala bocor ke luar sistem.

3. Bahaya Mekanik

Bahaya mekanik pada pesawat Linac dapat berasal dari operasi motor dan rantai penggerak dan dari komponen-komponen berat misalnya gantri. Bahaya lainnya adalah adanya tekanan tinggi dari gas freon pada *waveguide*. Tabung-tabung elektron seperti tabung thyratron dan tabung regulator merupakan subyek dari timbulnya suatu ledakan yang menimbulkan pecahna-pecahan kaca melayang.

4. Bahaya Panas

Banyak komponen di pesawat Linac beroperasi pada suhu tinggi dan dapat menimbulkan kebakaran. Komponen-komponen tersebut umumnya berada pada *power supply* khususnya pada tabung-tabung elektron.

ISSN : 0854 - 2910

6. Bahaya Gas Ozon

Pada pengoperasian mode elektron, berkas elektron yang ke atmosfer dapat menghasilkan gas ozon karena ionisasinya pada molekul-molekul udara.

PEMBAHASAN SISTEM KESELAMATAN

Penggunaan Linac medik adalah digunakan untuk menjaga dan meningkatkan kualitas hidup manusia. Jadi tidak seperti instalasi atom yang digunakan untuk riset di mana sebagian besar menyangkut personel internal, maka sebaliknya pesawat Linac untuk medik akan bersangkutan sebagian besarnya terhadap masyarakat luas. Untuk itu perhatian terhadap segi-segi keselamatan akan menjadi prioritas yang utama dengan cara di antaranya pemasangan sistem keselamatan yang memadai.

Berdasar atas jenis-jenis resiko yang timbul maka berikut ini sistem keselamatan yang dapat dipasang pada fasilitas-fasilitas Linac

1. Sistem Keselamatan Radiasi

Sistem ini memproteksikan adanya radiasi bocor ke luar ruangan Linac dan mencegah kemungkinan manusia terkena paparan radiasi tak terkendali disekitar pesawat Linac. Paparan radiasi ke luar dicegah dengan membuat dinding beton minimal setebal 1,5 meter. Sedangkan pencegahan kemungkinan terkenanya paparan tak terkendali dilakukan dengan cara-cara :

a. Penggunaan tombol-tombol darurat di pesawat Linac termasuk *power supply* dan di dinding ruangan pesawat. Bila tombol ini ditekan maka operasi pesawat Linac akan berhenti.
b. Penggunaan tombol darurat *"EMERGENCY OFF"* di meja pengendali untuk menghentikan radiasi dengan cepat manakala diperlukan.
c. Pemasangan tombol saklar (switch) pada bagian pintu ruang pesawat linac untuk memberikan signal ke pengendali operasi bahwa pintu tertutup.
d. Pemasangan kamera pada ruang Linac untuk menghindari adanya paparan radiasi kepada seseorang selain pasien.

2. Sistem Keselamatan Non Radiasi

Bahaya-bahaya yang menyangkut non radiasi penanganannya mengikuti prosedur konvensional yang umunya sudah dikenal, seperti penanganan bahaya tegangan tinggi, bahaya tekanan dan suhu tinggi. Berikut disajikan beberapa penanganan terhadap pencegahan timbulnya bahaya yang mungkin spesifik di pesawat Linac:

a. Diperlukan sistem monitoring bahwa pasien dan meja terapi pasien sudah terposisikan dengan benar untuk mencegah benturan sewaktu pemutaran gantri.
b. Adanya tekanan tinggi gas freon, maka sistem gelombang mikro harus dibuat tekanan atmosfer sebelum melepas komponen-komponen pada sistem tersebut. Hal ini untuk mencegah bahaya dari kerusakan tekanan internal pada komponen-komponen dan gasket-gasket.
c. Pemasangan blower pengisap ruangan pesawat Linac adalah penting untuk mengeluarkan gas ozon yang mungkin timbul pada pengoperasian mode elektron.

KESIMPULAN

Bahaya yang dapat terjadi pada pesawat linac untuk medik terdiri bahaya dari segi keselamatan radiasi dan non radiasi. Bahaya radiasi umumnya terjadi timbul radiasi primer, tetapi untuk linac yang menghasilkan sinar-x energi tinggi dapat terjadi radiasi residu pada komponen-komponen di sekitar target. Resiko non radiasi terdiri atas bahaya tegangan tinggi, komponen-komponen gantri (rangka peluncur), kebocoran gelombang mikro, tekanan tinggi gas freon dan terbentuknya gas ozon di ruang Linac. Untuk menanggulangi resiko tersebut dapat ditangani oleh sumber daya manusia setempat yang sudah terlatih serta dilengkapi oleh buku manual operasi yang lengkap .

DAFTAR PUSTAKA

1. J.A. Purdy and D.A. Goer, *Dual Energy X-Ray Beam Accelerators in Radiation Therapy:An Overview,* Nuclear Instrumentations and Methods in Physics Research B10/11 (1985) 1090-1095.
2. Kepala Instalasi Linac R.S. Dharmais "Komunikasi pribadi" di R.S.Dharmais, Jakarta, 24 Oktober 2001
3. Manual Linac Mitsubishi ML-6M, Japan
4. Instruction Manual Linac Mevatron 74, Siemens Medical Laboratories , INC , CA, USA, 1979.
5. Togap Marpaung, *Kecelakaan Radiasi Yang Terkait Dengan Peralatan Radioterapi,* Seri Informasi Keselamatan Nuklir No. 02 Rev. 0.0, Badan Pengawas Tenaga Nuklir.

Kembali Ke Daftar Isi