

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Deskripsi Sinar-X

Menurut Beiser (1992), sinar-X dihasilkan jika katoda di dalam tabung Röntgen dipanaskan. Bila antara anoda dan katoda diberi beda potensial yang tinggi, maka awan elektron dari katoda akan bergerak ke anoda dengan kecepatan tinggi. Elektron yang bergerak dengan kecepatan tinggi itu menumbuk sasaran pada anoda sehingga berubah menjadi sinar-X dan panas. Sinar-X dapat dibedakan menjadi 2 jenis berdasarkan proses terjadinya yaitu:

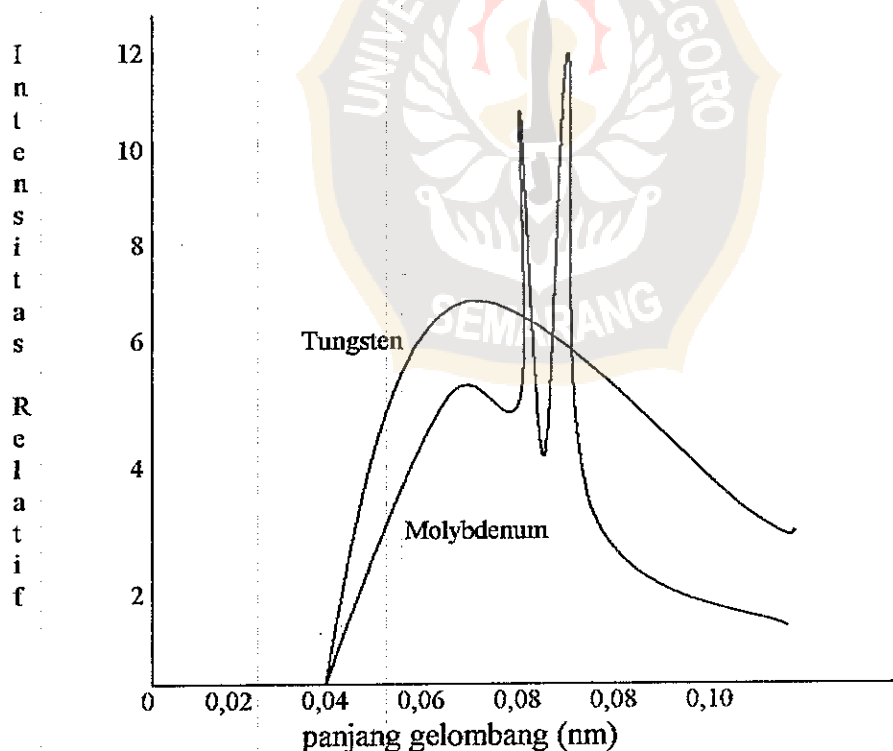
1. Radiasi dihasilkan akibat perlambatan berkas elektron cepat yang mengenai target (disebut "*Bremsstrahlung*") dan menghasilkan spektrum kontinu.
2. Radiasi yang dihasilkan akibat tumbukan berkas elektron cepat dengan elektron orbit dari atom sasaran, dikenal dengan sinar-X karakteristik yang memiliki spektrum garis.

Selain bermanfaat sinar-X juga dapat menimbulkan kerugian, antara lain efek yang diakibatkan oleh sinar-X tersebut akan merusak jaringan pada tubuh pasien. Dengan adanya kerugian pada penggunaan sinar-X ini, maka para ahli radiografi dituntut untuk dapat meningkatkan kualitas gambar radiografi yang baik serta dapat menekan efek yang terjadi pada penggunaan sinar-X terhadap pasien.

Pada praktek sehari-hari, upaya mengurangi efek radiasi terhadap pasien kurang diperhatikan sehingga untuk mendapatkan kontras gambar yang baik para ahli radiografi kurang memperhatikan faktor eksposi terutama dalam memvariasi

tegangan dan arus. Pada penggunaan tegangan tinggi dengan arus yang rendah, kontras gambar masih dapat dipertahankan dan dosis radiasi yang diterima pasien akan mengalami penurunan.

Menurut Beiser (1992), puncak intensitas yang tajam pada panjang gelombang tertentu merupakan timbulnya sinar-X yang besar pada panjang gelombang tertentu. Puncak-puncak ini timbul pada berbagai panjang gelombang tertentu untuk masing-masing bahan target dan asalnya adalah pemulihan kembali struktur elektron atom target setelah diganggu tembakan elektron. Suatu hal perlu diperhatikan pada bagian ini adalah produksi sinar-X untuk panjang gelombang khusus yang merupakan efek yang tidak klasik, sebagai tambahan pada produksi spektrum sinar-X yang kontinyu.



Gambar 2.1. Spektrum sinar-X tungsten dan molybdenum pada potensial pemercepat 35 kV (Beiser, 1992)

Sinar-X yang timbul pada suatu potensial pemercepat tertentu (V) dalam panjang gelombangnya bermacam-macam, tetapi tidak terdapat panjang gelombang yang lebih kecil dari suatu harga tertentu (λ_{\min}). Bertambahnya V akan menyebabkan mengecilnya λ_{\min} , untuk suatu harga V , λ_{\min} untuk target molybdenum dan tungsten harganya sama.

Duane dan Hunt dalam Meredith dan Massey (1977), menemukan secara eksperimen bahwa λ_{\min} berbanding terbalik dengan V . Karena fungsi kerja hanya beberapa eV, sedangkan potensial pemercepatnya dalam tabung sinar-X biasanya puluhan atau ratusan ribu volt, maka kita dapat mengabaikan fungsi kerja dan menafsirkan batas panjang gelombang terkecil dan persamaan (2.1) yang bersesuaian dengan seluruh energi kinetik.

$$E_k = eV \quad (2.1)$$

dari elektron yang datang seluruhnya diberikan pada foton tunggal mempunyai energi $h\nu_{\max}$ sehingga:

$$E_k = eV = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{1,24 \times 10^{-6}}{V} \quad (2.2)$$

Menurut Beiser (1992) sinar-X memiliki sifat menjalar menurut garis lurus walaupun melalui medan listrik dan medan magnet ketika menembus bahan. Sinar-X ini akan menyebabkan bahan berfosfor akan berpendar dan menyebabkan

perubahan pelat fotografi. Berdasarkan pengukuran panjang gelombang sinar-X yang dilakukan oleh Laue pada tahun 1912, terlihat bahwa panjang gelombang sinar-X yang digunakan memiliki orde hampir sama dengan jarak antara atom-atom dalam kristal, yaitu sekitar beberapa nanometer. Sehingga kristal dapat dipakai untuk mendefraksi sinar-X, dengan kisi kristal berlaku sebagai kisi tiga dimensi. Percobaan oleh Bragg pada tahun 1913, memperlihatkan bahwa berkas sinar-X monokromatik yang jatuh pada sebuah kristal akan dihamburkan ke segala arah tetapi karena keteraturan letak atom-atom, pada arah tertentu gelombang hambur itu akan berinteraksi konstruktif sedangkan pada arah yang lain akan berinteraksi destruktif.

Ahli fisika Inggris Maxwell pada tahun 1864 mengemukakan bahwa muatan listrik yang dipercepat menimbulkan gangguan listrik dan magnetik yang terkait menjalar terus menerus melalui ruang hampa. Kelajuan gelombang elektromagnetik di dalam ruang hampa ditunjukkan oleh (Bushong, 1988) :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.3)$$

dengan :

ϵ_0 = permitifitas ruang hampa ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)

μ_0 = permeabilitas magnetik ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

sehingga: $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

Hubungan antara kelajuan, frekuensi dan panjang gelombang (Bushong, 1988):

$$c = \lambda \nu \quad (2.4)$$

dengan :

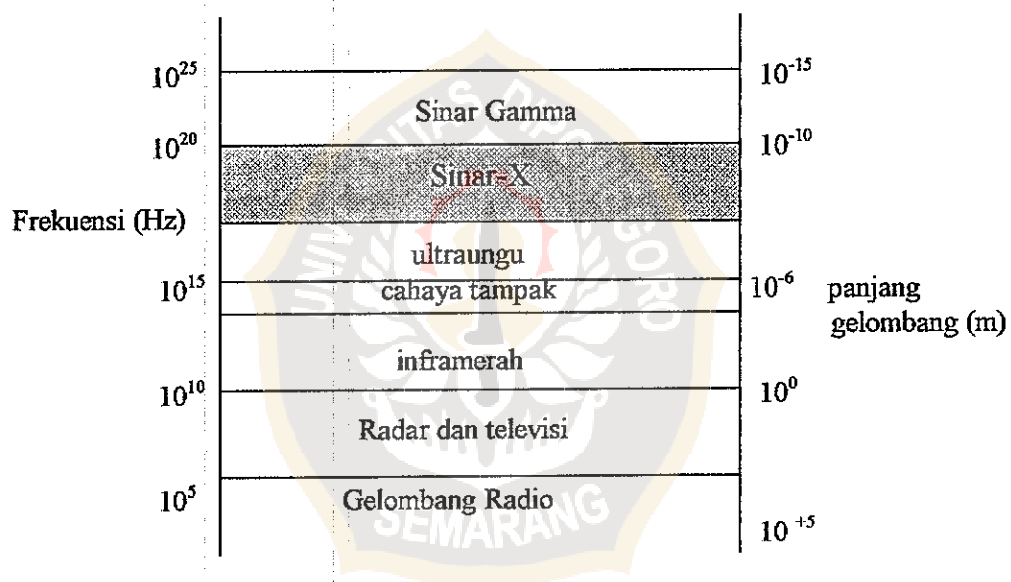
c = kecepatan

ν = frekuensi

λ = panjang gelombang

Spektrum gelombang elektromagnetik yang memuat sinar-X ditunjukkan pada

Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Spektrum gelombang elektromagnetik (Beiser, 1992)

2.2. Arus dan Tegangan Listrik pada Tabung Sinar-X

Arus I didefinisikan sebagai laju pengangkutan muatan melalui permukaan tertentu dari sistem hantar. Kuat arus dirumuskan (Reitz, 1993) :

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.5)$$

dengan:

I = arus listrik (ampere)

dq = muatan listrik(coulomb)

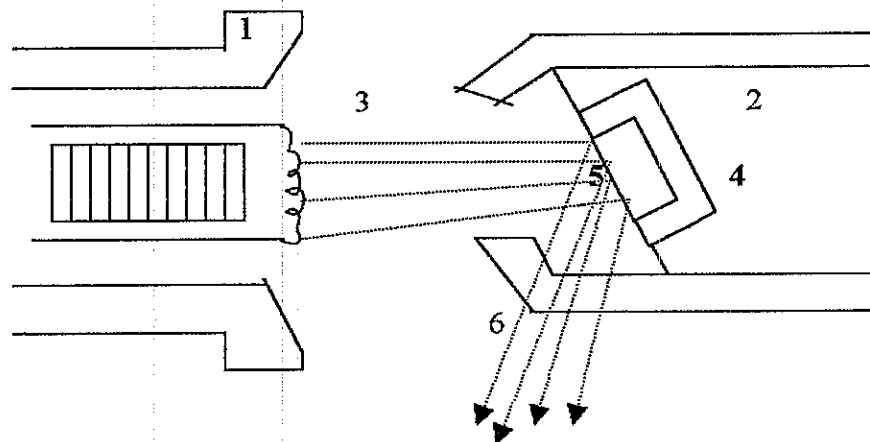
dt = waktu(detik)

Dalam pesawat sinar-X, arus I ini berfungsi untuk memanasi filamen agar terjadi efek termionik sehingga filamen akan melepaskan elektron.

Bila sejumlah muatan (elektron) dq yang dihasilkan dari filamen, bergerak di bawah pengaruh beda potensial V , muatan ini akan dipercepat oleh tambahan tenaga dari medan listrik tabung sehingga akan menumbuk target.

2.3. Pembangkitan Sinar-X

Sinar-X dihasilkan jika filamen (katoda) dalam tabung röntgen dipanaskan dengan arus listrik hingga suhunya lebih dari 2000°C , sehingga terjadi awan-awan elektron di sekitarnya yang disertai emisi termionik. Bila antara anoda dan katoda diberi beda potensial tinggi, maka elektron-elektron itu akan bergerak dengan kecepatan tinggi dari katoda melalui ruang hampa menuju anoda. Elektron yang bergerak dengan kecepatan tinggi itu menumbuk sasaran, sehingga tenaga gerak elektron itu akan berubah menjadi sinar-X (lebih kurang 1%) dan selebihnya berubah menjadi panas (Beiser, 1992). Struktur tabung sinar-X disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Tabung pembangkit sinar-X (Bushong, 1988)

Keterangan gambar:

- | | |
|------------|-------------------------|
| 1. katoda | 4. Anti katoda |
| 2. anoda | 5. Fokal spot |
| 3. filamen | 6. Filter dan kolimator |

Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi. Di dalam teori elektromagnetik disebutkan bahwa muatan listrik yang diberi tegangan sangat tinggi akan meradiasi gelombang elektromagnetik dan elektron yang bergerak cepat dan tiba-tiba dihentikan akan mengalami suatu perubahan kecepatan, sehingga akan memancarkan radiasi yang disebut "*Bremsstrahlung*" (radiasi pengereman) (Beiser, 1992).

Bremsstrahlung merupakan proses yang menjelaskan timbulnya sinar-X yang terpancar bilamana partikel-partikel dengan laju tinggi mengalami suatu perubahan kecepatan. Bilamana suatu partikel beta melintas dekat dengan suatu nukleus (inti atom), maka gaya tarik Coulomb yang kuat menyebabkan partikel beta menyimpang secara tajam dari lintasan awalnya. Perubahan arah yang disebabkan oleh percepatan radial dan partikel beta, sesuai dengan teori klasik, energi yang

hilang oleh radiasi elektromagnetik pada laju yang sebanding dengan kuadrat kecepatan. Foton-foton Bremsstrahlung memiliki suatu distribusi energi yang kontinu yang berkisar bawah dari nilai maksimum teoretis yang sama dengan energi kinetiknya dari partikel beta (Cember, 1983).

Untuk menafsirkan bahaya *Bremsstrahlung* dapat dipergunakan perumusan (Cember, 1983) :

$$f = 3,5 \times 10^{-4} Z E \quad (2.6)$$

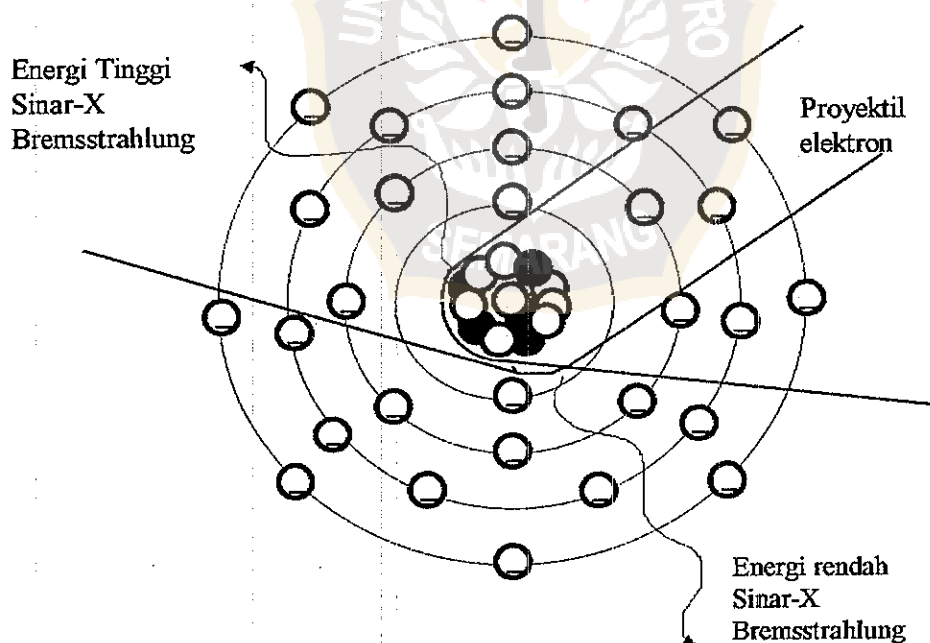
dengan:

f = fraksi energi beta yang menyertai yang diubah menjadi foton

Z = nomor atom penguap

E = energi maksimum partikel beta, MeV

Peristiwa Bremsstrahlung disajikan pada Gambar 2.4.

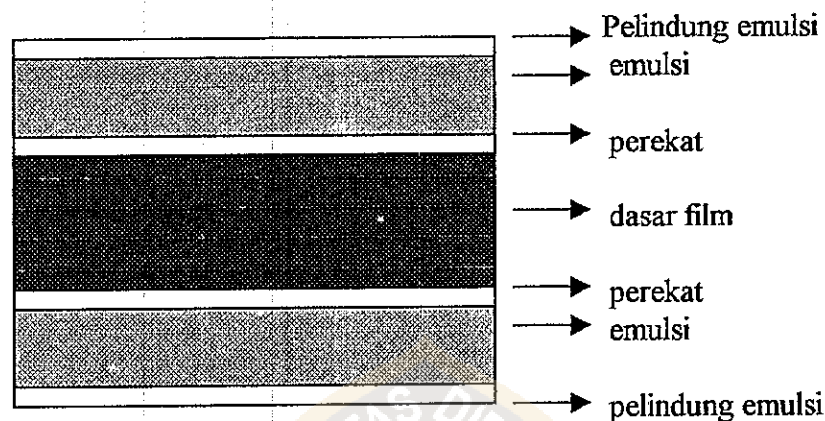


Gambar 2.4. Sinar-X Bremsstrahlung hasil interaksi antara proyektil elektron dengan inti atom (Bushong, 1988)

2.4. Proses Pembentukan Bayangan Konvensional

2.4.1. Struktur Film Röntgen Konvensional

Film röntgen yang dipergunakan untuk membuat gambar terdiri dari tujuh lapisan yang memiliki ketebalan kurang dari 0,2 mm (Meredith dan Massey, 1977).



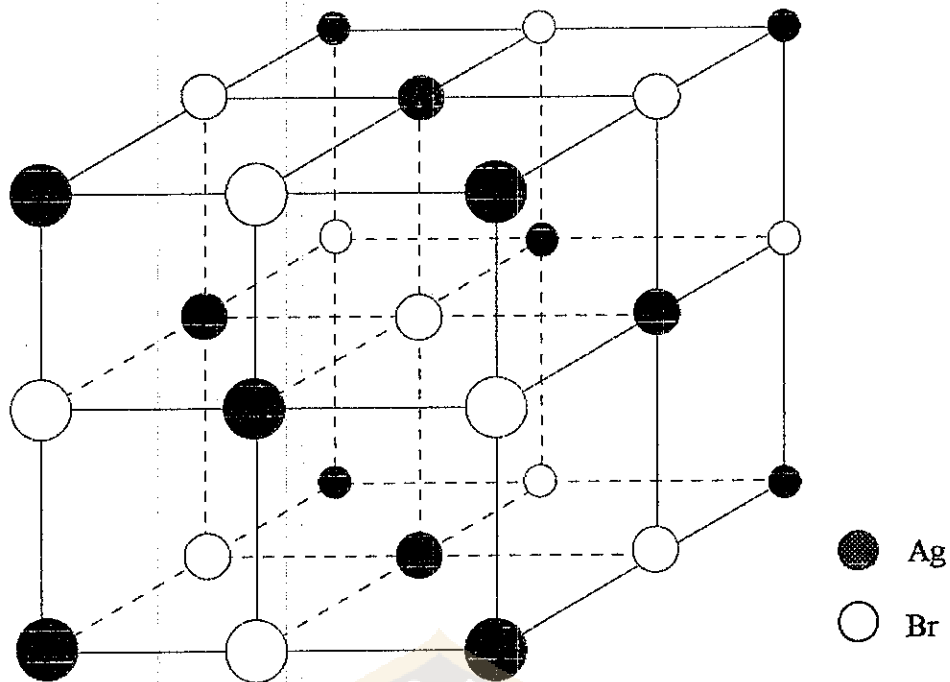
Gambar 2.5

Struktur dasar film röntgen 2 emulsi (Meredith dan Massey, 1977)

Pelindung emulsi berfungsi untuk melindungi film dari pengaruh mekanis. Lapisan emulsi terdiri dari gelatin sebagai bahan dasar dan perak nitrat (AgBr) yang mempunyai sifat sensitif terhadap sinar-X. Dasar film terbuat dari bahan cellulose acetate, sejak tahun 1960 digunakan polyester (Bushong, 1988).

2.4.2. Pembentukan Bayangan Laten

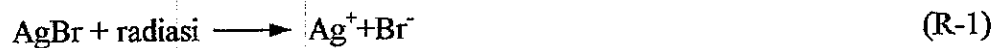
Banyaknya foton sinar-X yang mengenai film berbeda-beda tergantung pada penyerapan sinar-X di dalam obyek atau tubuh pasien, sehingga terbentuk pola bayangan laten pada film yang baru dapat dilihat setelah diolah (Meredith dan Massey, 1977).

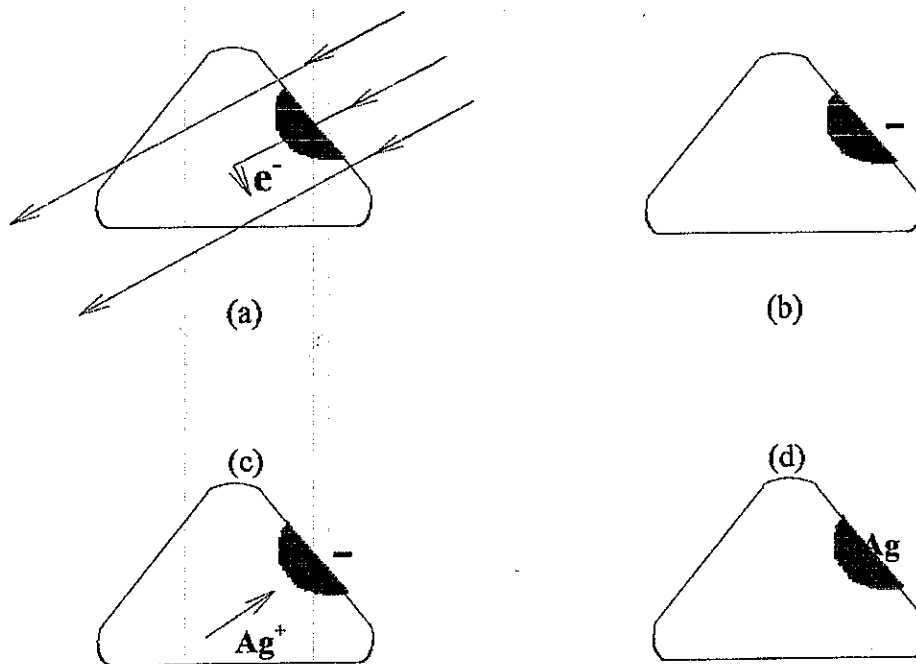


Gambar 2.6. Kristal AgBr (Beisser, 1992)

Pada waktu pembuatan kristal AgBr timbul kesalahan-kesalahan, antara lain tercampur dengan bahan kimia lain seperti "*sulphur compound allythio carbonide*" yang disebut titik sensitivitas yang terdapat pada permukaan kristal. Titik sensitivitas tersebut mempunyai sifat menangkap elektron dan akan terbentuk logam perak yang hitam (lihat Gambar 2.6).

Secara kimia prosesnya dapat dituliskan:





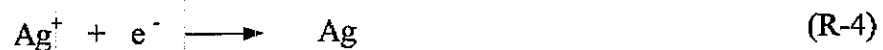
Gambar 2.7. Proses pembentukan bayangan laten (Meredith dan Massey, 1977)

2.4.3. Penetapan Gambaran Laten

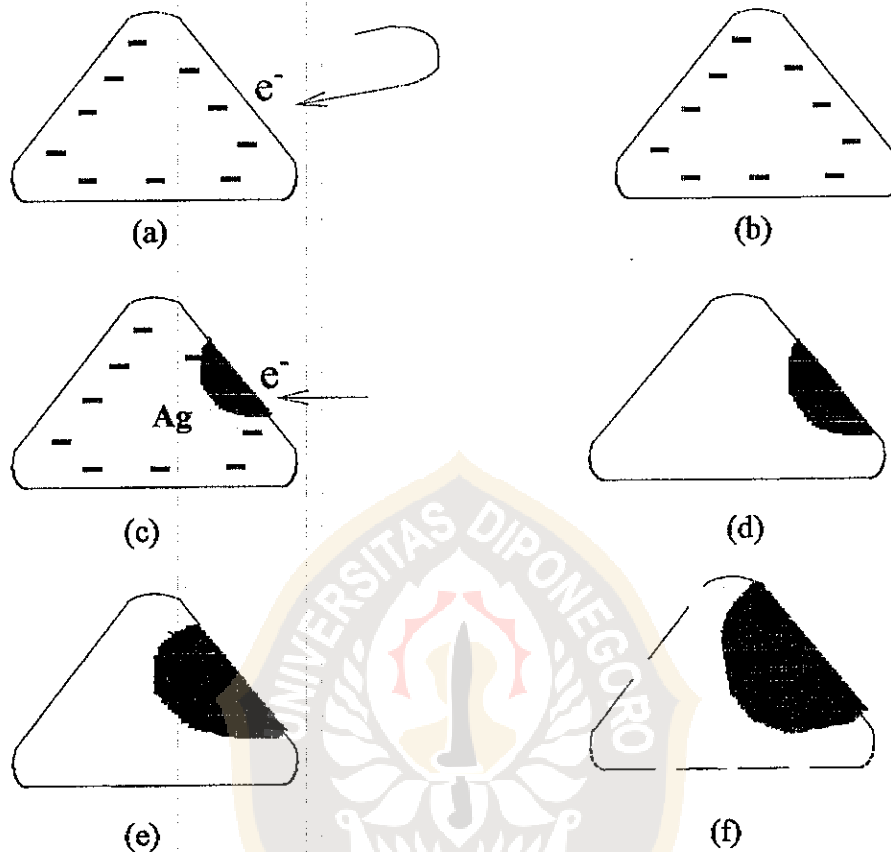
Penetapan gambar laten menjadi gambar nyata melalui tahap-tahap sebagai berikut:

a. Proses pengembangan

Di dalam pengembangan terjadi proses mengubah kristal-kristal yang mengandung gambar laten ke dalam Ag yang hitam dan tidak mengubah kristal yang tidak mengandung gambar laten. Pengubahan AgBr ke dalam Ag dapat terjadi bila larutan *developer* (pengembang) dapat memberi elektron-elektron ke kristal karena ini menghasilkan pengubahan ion Ag^+ menjadi atom Ag (Meredith dan Massey, 1977).



Bahan kimia yang dapat memberi elektron disebut "*reducing agent*" dan aksi kimia yang menyebabkannya disebut reduksi.



Gambar 2.8. Proses pengembangan (Meredith dan Massey, 1977)

Keterangan gambar:

- A dan B : tidak ada efek tanpa gambaran laten
 C - F : pembentukan butir Ag

Gambar A dan B (dari Gambar 2.8) dengan adanya perintang negatif pada AgBr yang tidak kena sinar, akan menolak elektron dari *developer*, jadi tidak ada efek. Pada Gambar C sampai F, kristal AgBr yang mempunyai gambaran laten terdapat tumpukan atom-atom Ag pada permukaan kristal yang menyebabkan perintang retak. Dari tempat retak inilah elektron-elektron di dalam cairan pengembang dapat

menembus ke dalam kristal dan mengakibatkan reduksi ion-ion Ag. Proses ini berlangsung sampai semua ion-ion Ag berubah menjadi atom Ag dan semua ion-ion Br masuk ke dalam pengembang. Gambar laten AgBr berubah dari kekuningan menjadi hitam. Cairan pengembang terdiri dari beberapa bahan, antara lain:

1. "*Reducing agent*" terdiri dari hydroquinon dan phenidone yang merupakan bahan pereduksi yang mudah teroksidasi.
2. "*Accelerator*" terdiri dari Natrium karbonat yang berfungsi sebagai bahan pengaktif terhadap reducing agent.
3. "*Precervative*" terdiri dari Natrium sulfat yang berfungsi mengurangi pengaruh oksidasi terhadap reducing agent.
4. "*Restrainer*" terdiri dari Kalium bromida yang berfungsi membatasi daya kerja reducing agent.
5. "*Solvent agent*" terdiri dari air sebagai bahan pelarut dalam jumlah tertentu dan tidak mengandung garam-garam mineral.

b. Proses Penetapan (fixasi)

Di dalam penetapan hanya terjadi proses melarutkan dan mengeluarkan AgBr yang tidak terkena sinar dari film. AgBr mula-mula membentuk molekul yang kompleks dengan bahan pen tetap, setelah itu molekul tersebut larut dalam larutan pen tetap berikutnya, sehingga waktu yang diperlukan untuk proses penetapan lebih banyak dibandingkan dengan waktu proses pengembangan. Cairan proses penetapan terdiri dari (Meredith dan Massey, 1977):

1. "*Fixing agent*" berfungsi merubah perak bromida menjadi unsur yang larut dalam air.
2. "*Accelerator*" terdiri dari *acetic acid* dan amonium tiosulfat yang berfungsi menghentikan aksi pengembangan dengan cepat dan merata.
3. "*Precervative*" terdiri dari sodium sulfat yang berfungsi mencegah terjadinya oksidasi.
4. "*Hardener*" terdiri dari potasium alum berfungsi menyamak emulsi film.
5. "*Solvent agent*" terdiri dari air sebagai bahan pelarut.
6. "*Buffer*" terdiri dari *acetic acid* berfungsi sebagai bahan untuk menjaga keseimbangan pH cairan penetap.

2.5. Eksposi Sinar-X

Menurut Meredith dan Massey (1977), faktor-faktor yang mempengaruhi densitas dan kontras radiografi, dikelompokkan dalam dua kategori yaitu faktor eksposi dan faktor *screen film*. Faktor eksposi adalah faktor yang mempengaruhi kuantitas dan distribusi tenaga radiasi yang akan dipaparkan pada reseptor gambar sedangkan faktor *screen film* adalah faktor yang mempengaruhi penerimaan tenaga radiasi oleh reseptor gambar untuk diserap dan diterjemahkan ke dalam densitas dan kontras film. Faktor eksposi ini sangat dipengaruhi oleh tegangan dan arus.

2.6. Tegangan

Menurut Meredith dan Massey (1977), tegangan berperan sebagai daya tembus yang menentukan kualitas radiasi. Besar kecilnya pemakaian tegangan

tergantung pada keadaan pasien. Pada keadaan pasien yang memiliki organ yang tebal maka dibutuhkan tegangan yang lebih besar dan sebaliknya untuk pasien yang kurus atau organ yang lebih tipis dan lunak dibutuhkan tegangan yang lebih kecil. Pengaruh dari besar kecilnya tegangan antara lain bila tegangan naik maka densitas akan meningkat akan tetapi kontras film akan menurun serta dosis radiasi terhadap pasien pun akan berkurang dan hal itu terjadi sebaliknya. Pengaturan tegangan akan mempengaruhi 2 karakteristik emisi sinar-X dari target (sasaran), yaitu kualitas dan intensitas emisi sinar-X.

a). Kualitas emisi sinar-X

Yang dimaksud dengan kualitas adalah energi foton efektif dari sinar-X, dalam radiografi hal tersebut mempunyai arti:

- 1). Mempengaruhi kemampuan sinar-X dalam menembus obyek. Makin tinggi tegangan maka makin kuat daya tembusnya.
- 2). Mempengaruhi kontras radiografi. Makin kecil tegangan maka makin tinggi kontras radiografi.
- 3). Mempengaruhi dosis radiasi terhadap pasien. Dosis radiasi dapat dikurangi jika tegangan makin tinggi.

b). Intensitas emisi sinar-X

Intensitas adalah tingkat arus energi radiasi per unit area secara diagonal dari sinar. Kenaikan tegangan akan memperbesar intensitas radiasi yang keluar dari target (sasaran) dan intensitas radiasi yang mencapai film dan juga akan menambah densitas film.

2.7. Arus Tabung Sinar-X

Arus akan mempengaruhi jumlah radiasi yang keluar dari tabung sinar-X dan sampai ke film. Pada awal suatu pemotretan biasanya arus terlebih dahulu dipilih, kemudian ditentukan waktu lamanya penyinaran yang akan dipakai sesuai dengan kebutuhan arus yang akan digunakan.

Untuk dapat membuat suatu eksposi yang layak maka yang perlu diperhatikan adalah (Meredith dan Massey, 1977):

- a). Penggunaan arus yang besar (rating fokus yang lebih besar) akan menambah ketidak tajam geometri, tetapi kontras akan bertambah.
- b). Dapat digunakan penyesuaian antara film dan tabir penguat maka faktor eksposi dapat dikurangi sehingga dapat diperoleh penghitaman film dengan menggunakan jumlah radiasi sinar-X lebih sedikit.
- c). Kemungkinan lain adalah mengurangi waktu eksposi sehingga ketidak-tajaman karena pergerakan berkurang dengan menggunakan arus yang lebih besar dalam mendapatkan hasil gambaran yang tetap baik.

2.8. Waktu Eksposi Sinar-X

Efek penting dari waktu eksposi pada hasil gambaran radiografi adalah densitas dan ketidak tajam gerakan. Misalnya untuk pemotretan tangan yang dapat dibuat diam sehingga tidak ada gerakan secara voluntari dan involuntari seperti colon (usus), maka waktu yang digunakan harus singkat.

2.9. Dosis Radiasi

Dalam praktek sehari-hari, faktor eksposi juga mempengaruhi jumlah radiasi yang dihasilkan, baik itu radiasi primer maupun radiasi sekunder. Dalam hal hubungan faktor eksposi dengan dosis radiasi, apabila nilai tegangan mengalami peningkatan dan arus mengalami penurunan maka dosis radiasi yang akan diterima oleh pasien akan berkurang tetapi radiasi hambur akan mengalami peningkatan. Tetapi apabila nilai tegangan berkurang, nilai arus bertambah maka dosis radiasi yang diterima pasien menjadi bertambah tetapi radiasi hambur menjadi berkurang.

Dosis radiasi tidak berhubungan langsung dengan kualitas gambar. Dosis berhubungan langsung dengan faktor eksposi terutama dengan nilai arus. Arus yang lebih tinggi dosis radiasi menjadi lebih besar. Kualitas gambar mempunyai nilai relatif baik terhadap arus, dengan catatan pada rentang arus tertentu masih dapat diupayakan kualitas gambar yang relatif baik (Meredith and Massey, 1972). Perhitungan penerimaan dosis radiasi (Meredith and Massey, 1972):

$$D = \frac{P \times (V)^2 \times i \times t}{d^2} \quad (2.7)$$

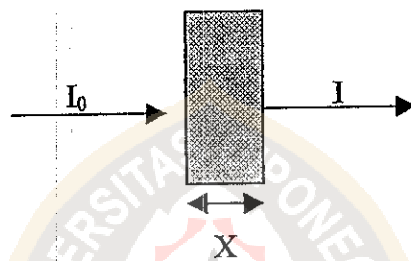
Keterangan

- D = Dosis Radiasi (mR)
- P = faktor dosis optimum (nilainya 15)
- d = jarak fokus film (FFD) dalam *cm*
- V = tegangan (kV)
- i = arus (mA)
- t = waktu eksposi (detik)

Dari rumus di atas kita dapat mengetahui masing-masing besar atau jumlah dosis radiasi yang akan diterima pasien. Pada saat dilakukan pengamatan terhadap kualitas gambar dapat ditentukan berapa tegangan tinggi yang baik untuk pemotretan paru-paru proyeksi *postero anterior* dengan memakai obyek pasien.

Dosis serapan sinar-X apabila melalui suatu bahan diberikan oleh (Beiser,1992):

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.8)$$



Gambar 2.9. Dosis serapan sinar-X yang melewati bahan (Beiser,1992)

keterangan:

- I = Intensitas sinar-X setelah melewati materi
- I_0 = Intensitas sinar-X mula-mula
- μ = koefisien serap bahan
- X = tebal bahan

Tebal lapisan materi dimana intensitas yang keluar menjadi setengah dari intensitas yang datang disebut *HVL (Half Value Layer)*. Besarnya *HVL* adalah (Beiser,1992):

$$HVL = 0,693/\mu \quad (2.9)$$