

BAB II

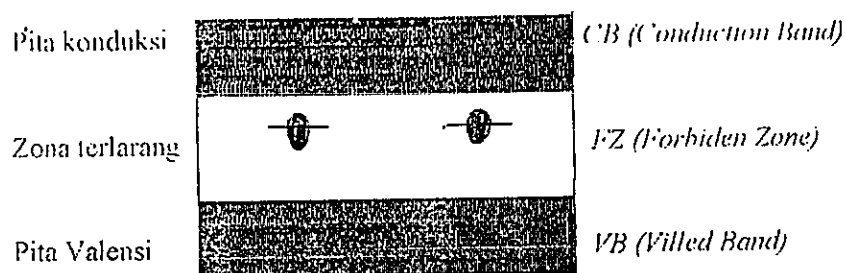
DASAR TEORI

2.1 Pengertian lembar penguat

Lembar penguat merupakan suatu perangkat yang dipasang dalam kaset yang berfungsi untuk mengubah berkas sinar-X yang menembus obyek menjadi cahaya tampak dan akan berinteraksi dengan film membentuk bayangan laten. Proses perubahan ini meliputi tiga tahap, yaitu absorpsi, konversi dan emisi (Robert, 1988). Kurang lebih 30 % dari energi gelombang sinar-X yang mengenai lembar penguat akan berinteraksi dengan lapisan bahan *fluoresensi* menghasilkan cahaya dalam jumlah besar (Bushong, 1988). Dalam hal ini lembar penguat juga sebagai penguat intensitas sinar-X yang telah menjadi cahaya tampak ketika mengenai film setelah menembus obyek. Proses penguatan ini disebabkan karena energi gelombang sinar-X yang diserap lembar penguat lebih besar dibanding energi yang diserap oleh film.

2.2 Prinsip Lembar Penguat

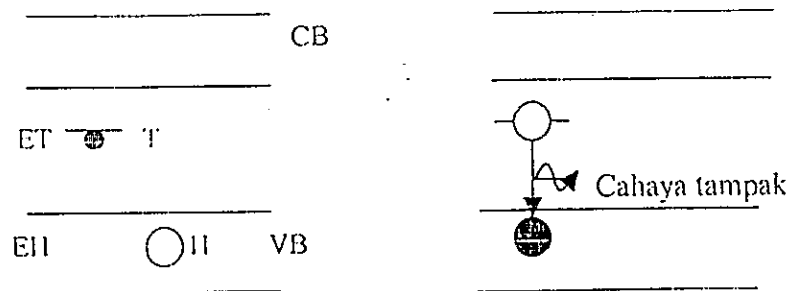
Prinsip kerja lembar penguat ini adalah menurut fenomena bila suatu kristal garam anorganik tertentu (misalnya fosfor yang dipakai sebagai bahan dasar lembar penguat) akan memancarkan cahaya ketika dikenai sinar - X.



Gambar 2.1 Pola-pola tingkat tenaga dalam kristal dan elektron trap

(Meredith dan Massey, 1977)

Fenomena ini disebut *fluorescent*. Fenomena *fluorescent* terjadi berdasarkan peristiwa fotolistrik dan emisi radiasi yang menjelaskan bahwa bila sebuah elektron pada atom dalam sistem terisolasi berpindah, maka terdapat kekosongan yang akan diisi oleh elektron lain dari tingkat energi yang lebih tinggi disertai pancaran energi elektromagnetik foton. Energi foton yang diemisikan sama dengan selisih energi dari dua tingkat (level) tenaga tersebut (Meredith dan Massey, 1977). Pola-pola pita tenaga yang terdapat pada bahan kristal yang murni terdiri dari pita konduksi, pita valensi dan daerah terlarang (lihat gambar 2.1).

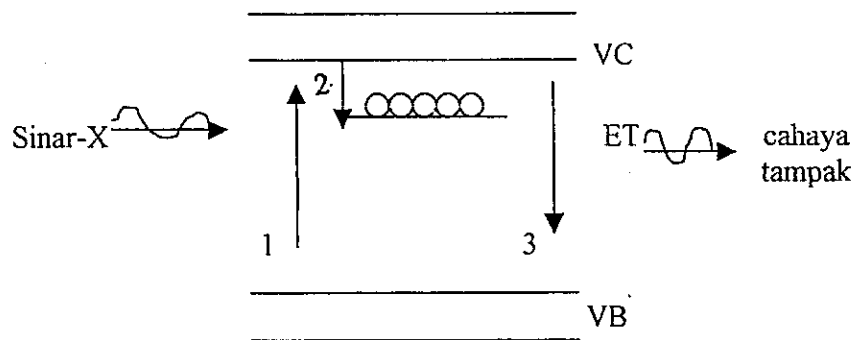


Gambar 2.2 Proses emisi cahaya dalam kristal (Meredith dan Massey, 1977)

Pada kristal yang tidak murni, dengan penambahan bahan pengotor tertentu, terdapat ekstra tenaga yang terletak di daerah terlarang yang akan menyerap elektron yang akan mengalami transisi dari tingkat tenaga yang lebih tinggi sehingga tingkat tenaga tersebut dinamakan *elektron trap* (Meredith dan Massey, 1977).

Dalam bahan *fluorescent* elektron trap tersebut akan terisi elektron. Elektron trap ini menentukan tingkat kepekaan pencahayaan pada kristal yang dipakai pada bahan lembar penguat, sehingga pembuatan bahan lembar penguat dipengaruhi oleh konsentrasi atom pengotor pada kristal.

Fenomena emisi cahaya tampak pada bahan penguat berlangsung jika terjadi transisi elektron dari elektron trap menuju pita valensi. Pada



Gambar 2.3 Proses *fluorescent* pada kristal

- 1) Transisi elektron menuju pita konduksi
- 2) Transisi elektron menuju jebakan elektron (elektron trap)
- 3) Transisi elektron menuju pita valensi (Meredith dan massey, 1977)

proses perpindahan elektron ini disertai pancaran berkas foton cahaya tampak, yang energinya sama dengan selisih antara tingkatan energi dari elektron trap dengan pita valensi (lihat Gambar 2.2) (Meredith dan Massey, 1977).

Pada proses *fluorescent* (lihat gambar 2.3) berkas foton sinar-X yang diserap lembar penguat akan berinteraksi dengan elektron yang memicu transisi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Kekosongan yang ditinggalkan elektron pada pita valensi akan segera diisi oleh elektron yang

pancaran foton cahaya tampak, dengan warna cahaya sesuai dengan bahan yang digunakan (sifat panjang gelombang dari bahan). Elektron yang naik ke pita konduksi akan segera mengisi jebakan elektron yang kosong dan siap untuk proses berikutnya (Meredith dan Massey, 1977).

Dengan waktu hidup elektron pada jebakan yang relatif jauh lebih lama dibanding waktu hidup elektron pada pita konduksi, maka apabila bahan *fluorescent* terkena radiasi akan terjadi perpendaran yang tidak langsung berhenti bila radiasi dihentikan.

Bahan *fluorescent* tersebut juga dapat menggandakan foton cahaya sinar-X yang mengenainya, sehingga intensitas foton cahaya lebih besar. Fenomena penggandaan foton tersebut terjadi karena proses emisi stimulasi dan hamburan berantai.

2.3 Jenis-jenis bahan *fluoresensi*

Bahan *fluoresensi* yang digunakan dalam lembar penguat harus memiliki dua karakteristik, yaitu mampu menyerap sinar-X secara efisien dan banyak memancarkan cahaya dengan sedikit *afterglow* (Cheney, 1971). Jenis-jenis bahan *fluoresensi* yang digunakan dalam lembar penguat dapat dibedakan menjadi dua, yaitu :

- a. Bahan *fluoresensi* murni, yaitu bahan *fluoresensi* yang memancarkan cahaya jika terkena radiasi.

- b. Bahan *fluoresensi* dengan pengaktif, yaitu merupakan bahan *fluoresensi* yang akan memancarkan cahaya bila ditambah bahan pengaktif. Fungsi bahan pengaktif adalah mempengaruhi warna cahaya yang dipancarkan oleh bahan *fluoresensi* serta dapat menyesuaikan kesensitifan film terhadap eksposi (Robert,1988).

Bahan *fluoresensi* murni yang sering digunakan untuk lembar penguat adalah kalsium tungsten (CaWO_4). Hasil eksitasinya dengan sinar-X akan menghasilkan spektrum cahaya biru dengan pancaran maksimal pada panjang gelombang 420 nm (Chesney,1981). Spektrum cahaya dari kalsium tungsten sering disebut juga dengan "*broad band emitter*".

Barium fluoroklorida (BaFCl) merupakan bahan *fluoresensi* dengan pengaktif yaitu europium yang digunakan dalam lembar penguat. Pancaran maksimal pada panjang gelombang 380 nm dengan spektrum warna biru. Selain itu juga terdapat jenis bahan *fluoresensi* lain yang menggunakan bahan pengaktif seperti silver zinc sulfida ($\text{ZnS} : \text{Ag}$) yang memancarkan cahaya secara maksimum pada panjang gelombang 435 nm dan barium lead sulfat ($\text{BaSO}_4 : \text{Pb}$) yang memancarkan cahaya dengan panjang gelombang 260-420 nm.

Sekarang ini, selain bahan *fluoresensi* konvensional telah dikenal jenis bahan *fluoresensi* baru yaitu bahan *fluoresensi* jenis *rare earth*. Bahan *fluoresensi* jenis ini mempunyai efisiensi yang tinggi dalam menyerap berkas

sinar-X dan mengubahnya menjadi cahaya tampak. Dalam pemanfaatannya, bahan *fluoresensi* jenis *rare earth* memerlukan bahan pengaktif yaitu terbium dan thulium. Fungsi utama dari bahan pengaktif ini adalah mempengaruhi warna dari spektrum yang dihasilkan dan juga memperkecil terjadinya *afterglow*. Spektrum cahaya yang dihasilkan oleh bahan *fluoresensi* jenis *rare earth* dengan bahan pengaktif sering disebut “*line emitter*”.

2.4 Konstruksi lembar penguat

Struktur lembar penguat terdiri dari beberapa lapisan, yaitu:

a. Lapisan dasar

Lapisan ini berfungsi sebagai penyokong lapisan yang lain. Terbuat dari bahan polyester. Bagian belakangnya dilapisi suatu bahan yang terbuat dari selulosa asetat agar lapisan dasar tidak berkerut. Lapisan dasar yang baik harus memenuhi ketentuan-ketentuan sebagai berikut : Permukaan licin dan anti air, tidak rusak karena radiasi, tidak berubah warna karena umur, tidak mempengaruhi bahan *fluorosensi*, lentur dan tembus sinar-X (Bushong,1988).

b. Lapisan *reflektif* atau lapisan *absorptif*

Lapisan *reflektif* ini berfungsi untuk memantulkan kembali cahaya menuju ke film. Lapisan ini terbuat dari Titanium dioksida (TiO_2) dan tebalnya kira-kira 30 mikron. Keuntungan lapisan *reflektif* ini adalah menambah

kecepatan kombinasi film dengan lembar penguat serta menurunkan dosis radiasi pasien tetapi menambah ketidaktajaman. Sedangkan bila menggunakan lapisan *absorptive*, cahaya akan diserap oleh zat warna pada lapisan ini. Sehingga kecepatan kombinasi film dengan lembar penguat lebih rendah, tetapi ketajaman gambar yang dihasilkan lebih tinggi.

c. Lapisan *substratum*

Lapisan ini berfungsi sebagai perekat untuk menjamin interaksi yang baik antara lapisan bahan *fluoresensi* dan lapisan dasar.

d. Lapisan bahan *fluoresensi*

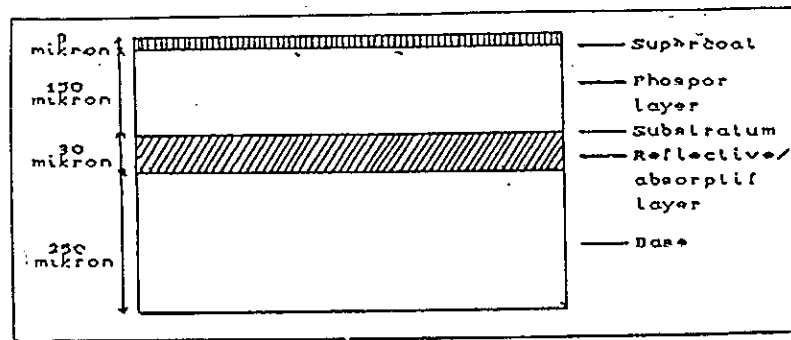
Lapisan ini mengandung kristal bahan *fluoresensi* yang diikat oleh suatu bahan tebalnya kira-kira 150 mikron. Bahan *fluoresensi* yang sering digunakan adalah :

1). Bahan *fluoresensi* (sering disebut “fosfor sinar-X”) konvensional yaitu :

Kalsium tungsten (CaWO_4), Barium fluoroklorida (BaFCl), Barium lead sulfat (BaSO_4).

2). Bahan *fluoresensi* “rare earth” yaitu:

Gadolinium oksisulfit ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$), Lanthanum oksibromid (LaO_2Br), Lanthanum oksisulfit (LaO_2S). Bahan *fluoresensi* ini biasanya diaktifkan dengan bahan tertentu yang disebut dengan aktivator.



Gambar 2.4 Konstruksi lembar penguat (Robert,1988)

e. Lapisan Pelindung

Lapisan pelindung tebalnya kira-kira 8 mikron, terbuat dari selulosa asetobiturat. Lapisan ini mempunyai tiga fungsi : mencegah adanya arus listrik statis, melindungi lapisan bahan *fluoresensi* dari kerusakan, serta mempunyai permukaan yang mudah dibersihkan tanpa merusak lapisan bahan *fluoresensi*.

2.5 Kecepatan lembar penguat

Kecepatan lembar penguat adalah kemampuan lembar penguat dalam mengubah energi sinar-X menjadi cahaya tampak pada eksposi yang diperlukan untuk menghasilkan densitas pada radiograf yaitu densitas yang besarnya sama dengan satu (Carrol,1985).

Jenis lembar penguat menurut kecepataannya dapat dibagi menjadi tiga :

a. Jenis lembar penguat kecepatan rendah

Lembar penguat jenis kecepatan rendah ini disebut juga "*high definition*" sangat baik digunakan untuk mendapatkan ketajaman yang tinggi. Pada lembar penguat ini memerlukan dosis radiasi dua atau tiga kali lebih besar dari pada jenis lembar penguat kecepatan sedang (Chesney, 1980)

b. Jenis lembar penguat kecepatan sedang

Jenis ini memberikan perbandingan yang terbaik antara kecepatan dan ketajaman, sehingga sesuai untuk digunakan pada seluruh pemeriksaan radiografi.

c. Jenis lembar penguat kecepatan tinggi

Jenis ini menghasilkan penghitaman yang lebih besar untuk setiap penyinaran dibandingkan kedua jenis lembar penguat sebelumnya, sehingga membutuhkan nilai eksposi yang lebih sedikit. Tetapi ketajaman gambar akan menurun karena adanya lapisan reflektif dan ukuran butiran bahan *fluoresensi* yang besar.

2.6 Faktor-faktor yang mempengaruhi kecepatan lembar penguat

a. Jenis bahan *fluoresensi*

Tipe bahan *fluoresensi* "*rare earth*" memiliki kemampuan mengubah energi gelombang sinar-X menjadi cahaya tampak yang lebih baik

dibanding kalsium tungsten. Sehingga lembar penguat dengan tipe bahan *fluoresensi* "rare earth" memiliki kecepatan yang lebih besar daripada lembar penguat dengan tipe bahan *fluoresensi* kalsium tungstate atau jenis bahan *fluoresensi* konvensional lainnya.

- b. Ketebalan lapisan bahan *fluoresensi* / kepadatan lapisan bahan *fluoresensi*
- Tebal tipisnya lapisan bahan *fluoresensi* akan berpengaruh terhadap ketidaktajaman lembar penguat. Pada tipe bahan *fluoresensi* yang sama, semakin tebal lapisan bahan *fluoresensi*, kecepatan lembar penguat semakin tinggi dan sebaliknya. Sedangkan kepadatan lapisan bahan *fluoresensi* adalah jumlah bahan *fluoresensi* per unit volume. Prinsipnya adalah semakin banyak jumlah kristal bahan *fluoresensi* setiap volume, semakin banyak cahaya yang dipancarkan karena *absorpsi* sinar-X semakin tinggi. Sehingga semakin besar kepadatan lapisan bahan *fluoresensi* kecepatan lembar penguat semakin tinggi.
- c. Adanya lapisan *reflektif*
- Dengan lapisan *reflektif*, sejumlah cahaya yang meninggalkan film akan dipantulkan kembali menuju film turut membantu proses pembentukan gambar, sehingga kecepatan lembar penguat meningkat.

d. Adanya lapisan *absorptif*

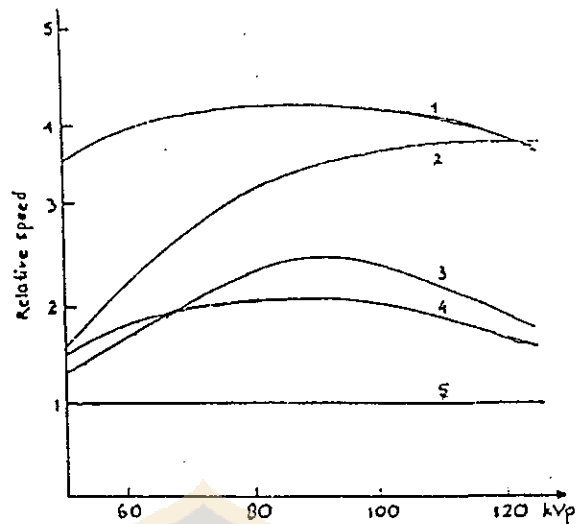
Lapisan *absorbtif* memiliki zat warna yang akan menyerap cahaya yang meninggalkan film. Hal ini menimbulkan efek berkurangnya kecepatan lembar penguat dan juga mengurangi ketidaktajaman.

e. Ukuran kristal bahan *fluoresensi*

Semakin besar ukuran kristal bahan *fluoresensi*, semakin besar pula penyerapan yang terjadi maka semakin banyak cahaya yang dipancarkan setiap adanya interaksi dengan energi gelombang sinar-X semakin besar pula kecepatan lembar penguat.

f. Pemilihan nilai tegangan tabung

Kecepatan lembar penguat jenis kalsium Tungstate tidak terpengaruh oleh perubahan nilai tegangan. Perubahan nilai tegangan tersebut sangat tampak pengaruhnya pada jenis lembar penguat "*rare earth*". Sehingga untuk memperoleh efisiensi total lembar penguat yang baik harus diikuti pemilihan nilai tegangan tabung yang benar yaitu dimana lembar penguat memperoleh kecepatan maksimumnya. Variasi kecepatan lembar penguat pada bermacam-macam bahan *fluoresensi* terhadap kVp dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.5 Grafik variasi kecepatan lembar penguat terhadap tegangan (kVp) (Roberts, 1988)

Keterangan gambar :

1. Sistem BaFCl:Eu dengan rentang kecepatan 350-400 ASA
2. Sistem Gd₂O₂S:Tb dengan rentang kecepatan 150-400 ASA
3. Sistem Gd₂O₂S:Tb dengan rentang kecepatan 130-240 ASA
4. Sistem LaO₂Br:Tb dengan rentang kecepatan 150-200 ASA
5. Sistem CaWO₄ dengan rentang kecepatan 100 ASA

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa lembar penguat jenis Gd₂O₂S:Tb mencapai kecepatan maksimum pada nilai 90 kVp (nilai kecepatan 240) yang akan menurun pada kV yang lebih rendah dan lebih tinggi. Jika sistem ini digunakan pada kV 70 misalnya nilai kecepatan akan menurun hingga 200.

Lembar penguat jenis LaO₂Br:Tb memperoleh kecepatan maksimum sebesar

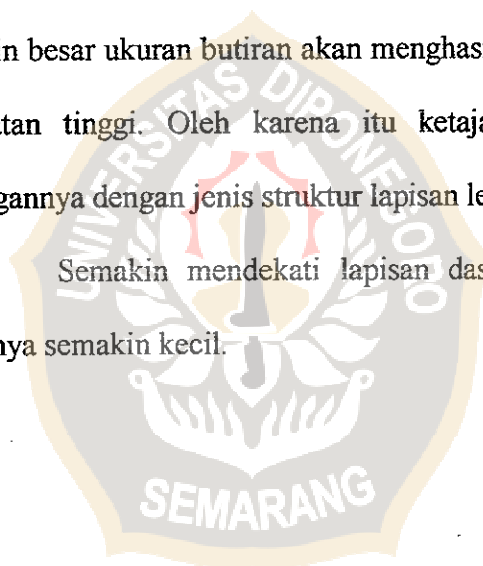
200 pada rentang 70-95 kV. Sedangkan pada lembar penguat jenis CaWO_4 kecepatannya tidak dipengaruhi nilai kV yang digunakan.

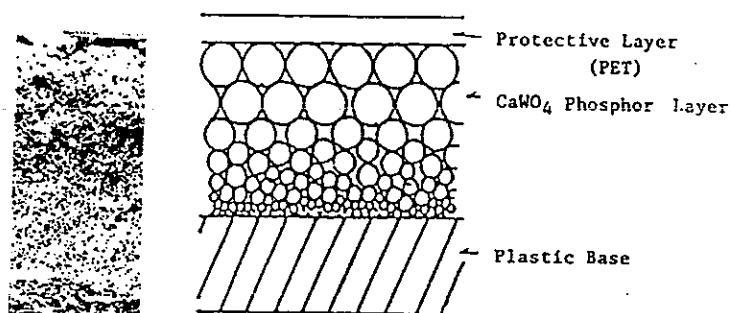
2.7 Struktur lapisan bahan *fluoresensi*

2.7.1 Struktur lapisan multi

Struktur lapisan multi mempunyai ukuran butiran yang beragam. Semakin kecil ukuran butiran, maka ketajaman yang dihasilkan akan semakin tinggi dan kecepatannya rendah. Sebaliknya semakin besar ukuran butiran akan menghasilkan ketajaman rendah dan kecepatan tinggi. Oleh karena itu ketajaman dan kecepatan erat hubungannya dengan jenis struktur lapisan lembar penguat.

Semakin mendekati lapisan dasar maka susunan partikel fosfornya semakin kecil.



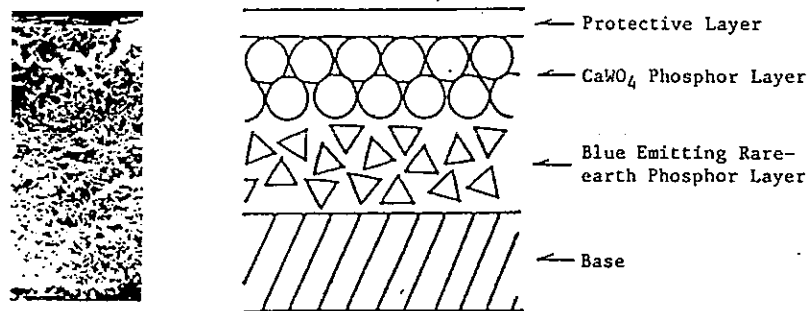


Gambar 2.6 irisan struktur lapisan multi (Kasei,1986)

2.7.2 Struktur lapisan double

Gambar 2.7 menggambarkan pancaran warna biru lembar penguat *rare earth* "Kyokko special" dengan struktur lapisan double.

Butiran BaFCl BaSO₄ : Eu mempunyai kecepatan tinggi dan memberikan ketajaman tinggi untuk butiran yang kecil. Upaya untuk meningkatkan hasil, dilakukan penambahan lapisan fosfor CaWO₄ sehingga diperoleh kualitas baik dengan ukuran butiran yang lebih besar. Struktur lapisan double dengan lapisan CaWO₄ berada dilapisan antara lapisan pelindung dan lapisan BaFCl BaSO₄.



Gambar 2.7 Gambar irisan struktur lapisan double (Kasei, 1986)

2.8 Faktor Intensifikasi

Faktor intensifikasi adalah perbandingan antara eksposi yang dibutuhkan untuk menghasilkan densitas tertentu pada film tanpa menggunakan lembar penguat dengan eksposi yang dibutuhkan pada film yang menggunakan lembar penguat untuk menghasilkan densitas yang sama (Jenkins, 1988).

$$IF = \frac{E_2}{E_1}$$

2-1

E_2 adalah eksposi tanpa menggunakan lembar penguat, sedangkan E_1 adalah eksposi dengan menggunakan lembar penguat.

Sedangkan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap faktor intensifikasi adalah : jumlah energi gelombang sinar-X yang diserap lembar

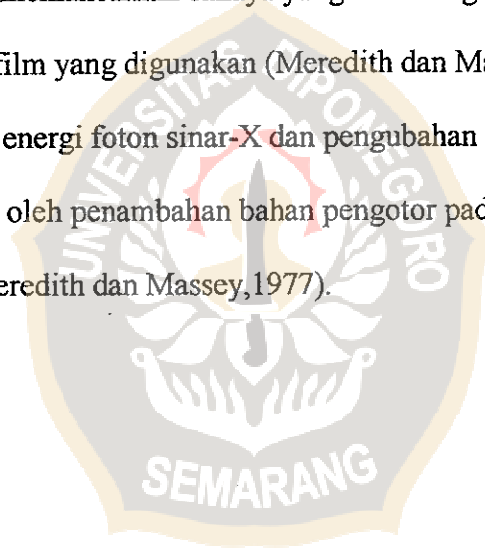
penguat, efisiensi konversi menjadi cahaya tampak, serta banyaknya cahaya yang mencapai film dan efeknya terhadap film.

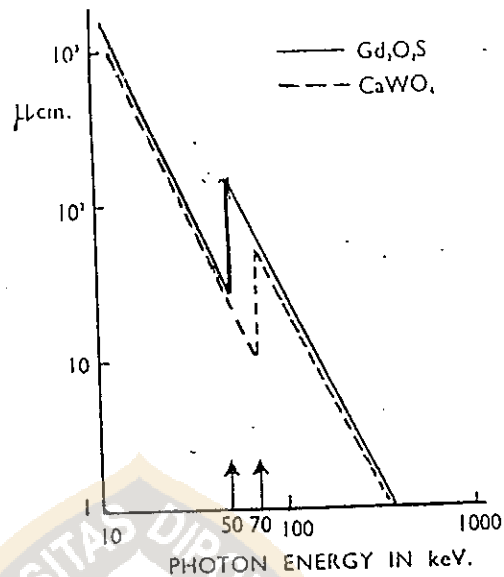
2.9 Spesifikasi bahan dasar pembuatan lembar penguat

Syarat utama bahan dasar dan pembuatan lembar penguat, adalah :

- a. Memiliki koefisien serap yang tinggi, biasanya bahan dengan nomor atom yang tinggi.
- b. Mampu memancarkan cahaya yang kuat dengan warna yang sesuai dengan film yang digunakan (Meredith dan Massey,1977).

Penyerapan energi foton sinar-X dan pengubahan menjadi cahaya tampak dipengaruhi oleh penambahan bahan pengotor pada saat pembuatan lembar penguat (Meredith dan Massey,1977).





Gambar 2.8 Grafik koefisien serap beberapa bahan dasar lembar penguat terhadap energi foton (Meredith dan Massey,1977)

Tabel 2.1 Bahan dasar lembar penguat (Bushong,1988)

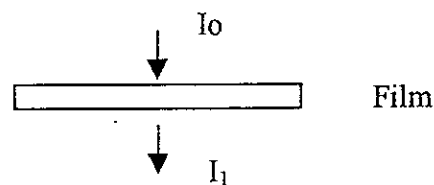
Elemen	Symbol kimia	Nomor atom (Z)	Energi serap (keV)
Yttrium	Y	39	17
Barium	Ba	56	37
Lanthanum	La	57	39
Gadolinium	Gd	64	50
Tungsten	W	74	70

2.10 Densitas Optik

Densitas optik radiograf merupakan tingkat kehitaman dari suatu radiograf. *Densitas optik* radiograf dapat dimulai dari berbagai tingkat kehitaman, mulai dari yang terhitam sampai putih. Penghitaman dihasilkan oleh pengembangan kristal-kristal perak bromida dalam emulsi film, sesuai dengan jumlah eksposi yang diterima dari tabung sinar-X. Semakin tinggi intensitas semakin tinggi kehitaman pada radiograf. Radiograf yang sangat hitam mempunyai densitas optik yang tinggi dan radiograf yang lebih terang mempunyai densitas optik yang rendah dengan skala 4 sebagai densitas optik maksimal dan skala 0 sebagai minimal. *Densitas optik* didefinisikan sebagai persamaan:

$$D = \text{Log} \frac{I_0}{I_1} \quad 2-2$$

Dengan I_0 adalah intensitas awal, I_1 adalah intensitas setelah menembus obyek dan D adalah densitas optik (gambar 2.9)



Gambar 2.9 Prinsip densitas optik (Meredith dan Massey, 1977)

Rentang *densitas optik* yang dijumpai pada *radiograf* untuk diagnosis dengan sinar-X adalah 0,25 – 2,5. *Densitas optik* ini diukur dengan *densitometer*.

2.11 Faktor eksposi

Produksi sinar-X sangat ditentukan oleh pengaturan faktor eksposi yang terdiri dari tegangan tabung, arus tabung dan waktu eksposi. faktor eksposi inilah yang menentukan intensitas sinar-X yang dihasilkan. Menurut Bushong (1988) faktor-faktor yang menentukan intensitas tersebut adalah:

- a. Tegangan tabung yang merupakan beda potensial antara katoda dan anoda didalam tabung yang diperlukan untuk memindahkan satu satuan muatan yaitu untuk menarik elektron dari filamen ke permukaan target yang tertanam dalam anoda. Intensitas sinar-X kira-kira sebanding dengan kuadrat beda potensialnya, sehingga bila beda potensial dinaikkan dua kali lipat, maka intensitas sinar-X akan bertambah empat kali lebih banyak. Hubungan antara beda potensial dengan intensitas dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \quad 2-3$$

Dengan I adalah intensitas sinar-X (watt/m²) dan V adalah beda potensial (kV).

Semakin tinggi tegangan tabung yang digunakan akan dihasilkan sinar-X dengan panjang gelombang lebih pendek sehingga memiliki daya tembus lebih besar. Penambahan tegangan tabung juga akan menambah jumlah pancaran radiasi dari target atau meningkatkan intensitas radiasi yang dipancarkan (Chesney, 1980).

- b. Kuat arus tabung (dalam milliampere) didefinisikan sebagai muatan listrik yang mengalir persatuan waktu melalui suatu penampang. Pada tabung sinar-X kuat arus merupakan arus yang mengalir dari anoda ke katoda. Arus ini menyatakan jumlah elektron yang dipancarkan. Menaikkan arus tabung akan memperbesar jumlah elektron yang tertumbuk ke anoda sehingga sinar-X yang dihasilkan lebih banyak. Hubungan ini dinyatakan dalam rumus :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{I_1}{I_2} \quad 2-4$$

Dengan i adalah kuat arus (ampere) dan I adalah intensitas (watt/m^2)

- c. Waktu eksposi (dalam detik) akan menentukan lamanya eksposi yang dilakukan. Menaikkan waktu eksposi berarti menambah jumlah radiasi yang mencapai obyek dan film.
- d. Jarak film-fokus (fokus film distance = FFD)

Jarak film fokus merupakan jarak antara fokus dengan film. Perubahan pada FFD berakibat pada perubahan nilai intensitas sinar- X yaitu:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \quad 2-5$$

Dengan d adalah jarak film-fokus (meter) dan I adalah intensitas

Lembar penguat dapat mempercepat aksi sinar-X dengan merubah energi sinar-X menjadi cahaya tampak, karena foton sinar-X dapat menghasilkan 80 – 95 foton cahaya, perubahan ini dapat mempercepat proses penyinaran film, sekitar 95 % kepadatan gambar akan terbentuk dari foton cahaya yang dikeluarkan oleh lembar penguat, karena lebih banyak cahaya yang dikeluarkan dari lembar penguat, sehingga penyinaran radiografi dapat diperkecil juga mengurangi dosis pasien.

Bila lembar penguat kecepatan tinggi, lebih sedikit penyinaran radiasi yang diperlukan untuk mendapat radiograf dibandingkan dengan lembar penguat kecepatan rendah (Edward et al,1990).

Intensitas dinyatakan sebagai jumlah energi yang mengalir persatuan waktu melalui satuan luasan, yang dipancarkan oleh tabung sinar-X. Pada arus tabung tertentu makin tinggi nilai tegangan tabung yang digunakan akan meningkatkan intensitas radiasi, karena intensitas berbanding dengan kuadrat tegangan tabung yang digunakan. Besarnya intensitas dinyatakan sebagai (Wilks,1987) :

$$I = \frac{V^2 \cdot i}{(FFD)^2} \quad 2-6$$

Dengan I adalah intensitas radiasi(R/s), V adalah tegangan tabung (KV), i adalah arus tabung (mA), FFD adalah jarak focus ke film (cm).

Untuk kebanyakan pesawat sinar-X, eksposi (mR) pada permukaan pasien dapat dihitung dengan rumus (Meredith,1988) :

$$E = \frac{V^2 \cdot i \cdot t}{(FFD)^2} \quad 2-7$$

Dimana FFD adalah jarak fokus film (cm), V adalah tegangan yang diberikan kepada tabung (dalam KV), i adalah arus tabung (dalam mA), t dalam detik.

