

BAB II DASAR TEORI

2.1. Interaksi Sinar γ dengan Materi

2.1.1. Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik adalah interaksi antara foton- γ dengan sebuah elektron yang terikat kuat dalam atom yaitu elektron pada kulit bagian dalam suatu atom, biasanya kulit K atau L. Foton- γ akan menumbuk elektron tersebut dan karena elektron itu terikat kuat maka elektron akan menyerap seluruh tenaga foton- γ . Sebagai akibatnya elektron akan dipancarkan keluar dari atom dengan tenaga gerak sebesar selisih tenaga foton- γ dan tenaga ikat elektron (E_b) (Knoll, 1979).

$$E_k = h\nu - E_b \quad (2.1)$$

dengan:

$E = h\nu$, adalah energi foton- γ (J)

E_k = energi kinetik elektron (J)

E_b = energi ikat elektron (J)

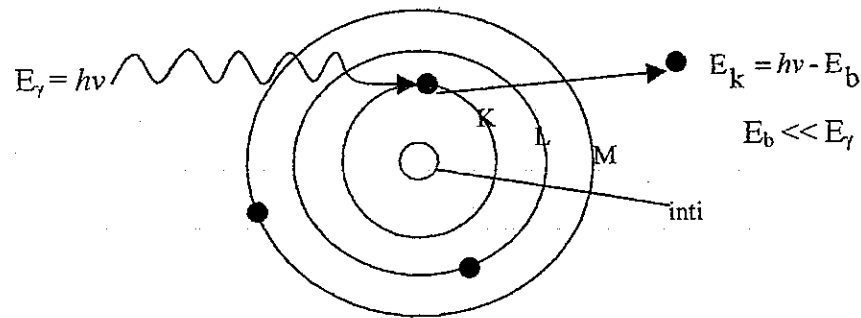
h = konstanta Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ Joule detik.

ν = frekuensi gelombang elektromagnetik yang diserap atau yang dipancarkan elektron (Hz)

Sedangkan harga energi ikat elektron ordenya sekitar beberapa keV sehingga persamaan 2.1 akan menjadi :

$$E_b \ll E_\gamma (= h\nu) \quad (2.2)$$

Efek fotolistrik secara skematis dapat digambarkan sebagai berikut .:

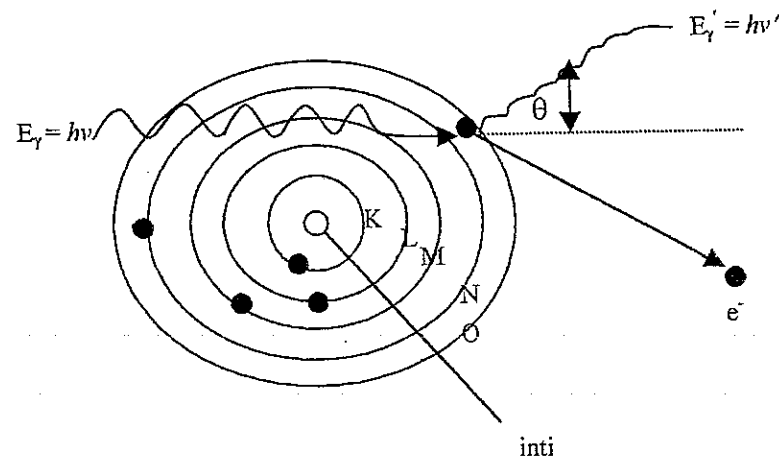


Gambar 2.1. Efek fotolistrik (Susetyo, 1988)

Dengan proses efek fotolistrik, diperoleh elektron yang mempunyai energi kinetik $E_k \approx h\nu$ yang terdistribusi secara diskrit sehingga akan menimbulkan tanggapan spektrum yang diskrit pula.

2.1.2. Hamburan Compton

Hamburan Compton terjadi antara foton- γ dan sebuah elektron bebas yang terdapat pada kulit terluar sebuah atom. Apabila foton- γ menumbuk elektron tersebut maka berdasarkan hukum kekekalan momentum tidak mungkin elektron akan dapat menyerap seluruh energi foton- γ seperti pada efek fotolistrik. Foton- γ akan menyerahkan sebagian energinya kepada elektron dan kemudian terhambur sebesar sudut θ terhadap arah gerak foton- γ datang (E_γ) yang digambarkan sebagai berikut (Beiser, 1983):



Gambar 2.2. Hamburan Compton (Susetyo, 1988)

Energi sinar- γ terhambur $h\nu'$, yang terhambur dengan sudut θ adalah sebagai berikut (Knoll, 1979):

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.3)$$

dengan m_0c^2 adalah energi diam dari elektron (0,511 MeV). Sedangkan energi kinetik dari elektron terhambur adalah :

$$E_k = h\nu - h\nu' = h\nu \left[\frac{\frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \right] \quad (2.4)$$

Jika $\theta \cong 0$, maka $h\nu' \cong h\nu$ dan $E_k \cong 0$ akan menyebabkan elektron Compton energi kecil dan sinar- γ terhambur yang mempunyai energi sama dengan energi sinar- γ

datang. Sedangkan untuk $\theta = \pi$ akan menyatakan energi maksimum yang dipindahkan ke elektron pada interaksi Compton.

Dari persamaan 2.3 dan 2.4 akan menghasilkan persamaan :

$$h\nu' \big|_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + 2 \frac{h\nu}{m_0 c^2}} \quad (2.5)$$

$$E_k \big|_{\theta=\pi} = h\nu \left[\frac{2h\nu / m_0 c^2}{1 + 2h\nu / m_0 c^2} \right] \quad (2.6)$$

dengan :

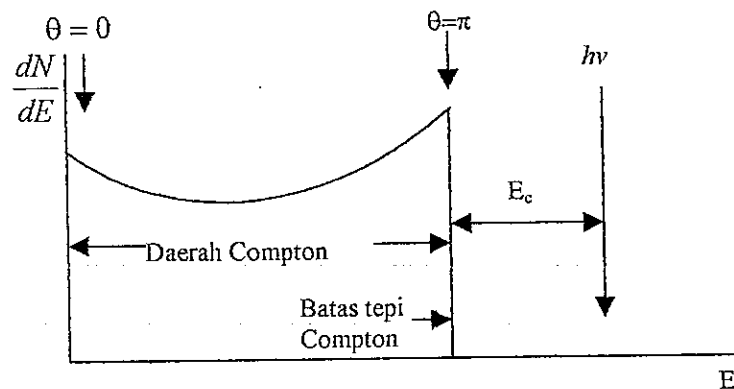
m_0 = massa elektron diam = $9,10953 \times 10^{-31}$ kg

c = laju cahaya dalam ruang hampa = $2,99792458 \times 10^8$ m/dt

Daerah compton berkisar dari $\theta = 0$ sampai titik maksimum yaitu saat $\theta = \pi$. Selisih antara energi elektron compton maksimum dengan sinar- γ datang dirumuskan :

$$E_c \equiv h\nu - E_k \big|_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + 2h\nu / m_0 c^2} \quad (2.7)$$

Distribusi energi elektron Compton dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.3. Distribusi energi elektron Compton (Knoll, 1979)

Jika energi sinar- γ besar atau $h\nu \gg m_0c^2/2$ maka besarnya jarak batas tepi Compton dengan E_γ fotolistrik dalam tanggapan spektrum sebesar :

$$E_c \cong \frac{m_0c^2}{2} (=0,256 \text{ MeV}) \quad (2.8)$$

Dari proses hamburan Compton ini diperoleh elektron yang mempunyai energi kinetik yang besarnya antara 0 sampai $(E_\gamma - 0,256) \text{ MeV}$ yang terdistribusi secara kontinu sehingga akan menimbulkan tanggapan spektrum yang kontinu pula (Knoll, 1979).

2.2. Detektor Sintilasi

Proses sintilasi adalah proses perpendaran cahaya. Detektor sintilasi merupakan detektor yang dapat mengubah radiasi menjadi suatu pendar cahaya. Pendar cahaya ini terjadi bila suatu bahan aktif detektor dilintas radiasi. Peristiwa pemancaran caahaya ini disebut sintilasi sedangkan bahannya disebut sintilator. Dilihat dari jenis bahan pembentuknya, sintilator dibedakan menjadi dua macam

yaitu sintilator organik dan anorganik. Contoh sintilator anorganik adalah NaI(Tl), CsI (Tl) dan ZnS(Ag). Sedangkan contoh sintilator organik antara lain antrasen, naphtalen dan stilben (Susetyo, 1988). Kristal NaI(Tl) mempunyai diameter dengan ukuran 0,75 m dan ketebalan 0,25 m serta mempunyai densitas sebesar $3,67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Emisi panjang gelombang maksimum kristal ini sebesar 410 nm dan efisiensi sintilasi sebesar 100 % serta mempunyai struktur kristal fcc (*face centered cubic*). Thallium (Tl) merupakan pengotor kristal dan berfungsi sebagai pengaktif proses pendar cahaya (Tsoulfanidis, 1983).

Di dalam detektor sintilasi, pendar cahaya merupakan gejala yang mewakili informasi fisis radiasi. Untuk itu diperlukan detektor sintilasi yang paling baik. Detektor sintilasi yang ideal mempunyai sifat-sifat sebagai berikut (Knoll, 1979):

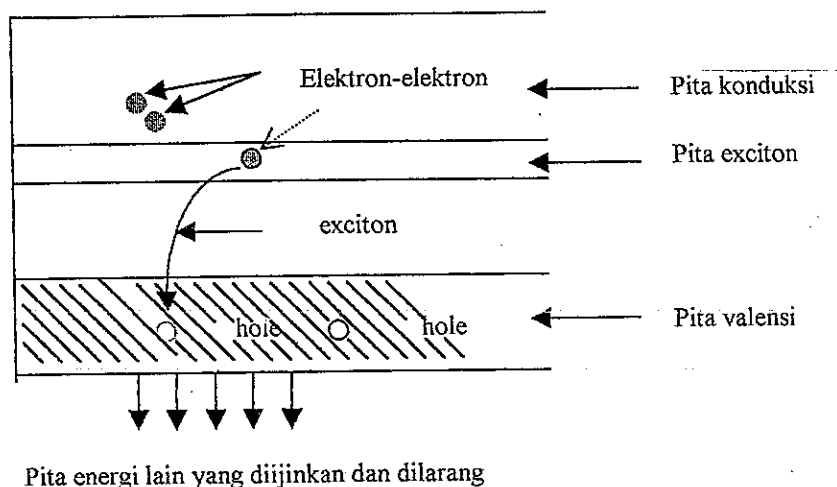
1. Efisiensi sintilasi tinggi, yaitu kemampuan detektor mengubah radiasi menjadi foton cahaya.
2. Linearitas baik, yaitu jumlah foton cahaya yang dihasilkan sebanding dengan energi radiasi yang datang.
3. Medium transparan bagi panjang gelombang emisi untuk pengumpulan cahaya yang sangat baik.
4. Waktu peluruhan luminisensi kecil sehingga pulsa-pulsa sinyal cepat dapat dibangkitkan.
5. Material (kristal) harus mempunyai kualitas optik yang baik dan dibuat dalam ukuran besar.
6. Indeks bias detektor mendekati indeks bias gelas yaitu $n = 1,5$ agar cahaya dapat diteruskan ke fotokatoda secara efisien.

Proses terbentuknya kelipan cahaya terjadi melalui dua proses yaitu flouresensi dan fosforesensi. Yang pertama apabila elektron menyerap tenaga dan tereksitasi lalu kembali lagi langsung ke keadaan dasar atau bisa juga melalui keadaan metastabil. Deeksitasi ini terjadi dalam waktu yang sangat singkat yaitu kecil dari 10^{-8} detik dan disebut *fluoresensi*. Jenis pancaran yang kedua dapat terjadi apabila suatu elektron yang berada dalam keadaan metastabil mendapat tambahan tenaga dari luar akan pindah ke tingkat tenaga yang lebih tinggi, lalu kembali ke keadaan dasar dengan memancarkan foton cahaya. Proses semacam ini disebut *fosforesensi* dan terjadi dalam selang waktu 10^{-8} detik. (Susetyo, 1988)

2.2.1. Mekanisme Kerja Detektor Sintilasi (Susetyo, 1988)

Sinar- γ yang masuk ke dalam detektor NaI(Tl) akan berinteraksi dengan atom-atom di dalamnya menurut efek fotolistrik dan hamburan Compton. Melalui interaksi ini sinar- γ akan menyerahkan sebagian atau seluruh tenaganya menjadi tenaga gerak elektron dan sebagai akibatnya akan dihasilkan elektron bebas.

Proses sintilasi terjadi bila atom sintilator tereksitasi dan diikuti deeksitasi sambil memancarkan foton cahaya. Detektor sintilasi terdiri atas dua bagian besar yaitu bagian sintilator dan bagian tabung pengganda elektron (PMT). Partikel γ yang datang akan mengeksitasi sintilator kemudian deeksitasi sambil memancarkan pendar cahaya.



Gambar 2.4. Tingkat energi pada kristal NaI(Tl)
(dimodifikasi dari Tsoulfanidis, 1983)

Pada gambar diatas, elektron pada suatu atom menempati tingkat-tingkat energi yang sudah tertentu. Tingkat energi bersifat diskrit. Elektron-elektron valensi atom-atom dalam kristal terdapat dalam pita tenaga atau pita valensi. Pita tenaga lain yang kosong dinamakan pita konduksi. Antara pita valensi dan pita konduksi terjadi kesenjangan tenaga (*energy gap*) sebesar ΔE yang merupakan daerah terlarang dan elektron tidak dapat menempati daerah ini. Apabila elektron valensi mendapat tenaga dari luar maka elektron tersebut dapat naik ke pita konduksi (eksitasi) dengan meninggalkan lubang (*hole*). Pasangan elektron dan lubang ini disebut *exciton*. Kadangkala energi yang mengenai elektron tidak cukup untuk menaikkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi sehingga elektron berada dalam pita *exciton* yang lebarnya sebesar 1 eV. Dengan adanya aktivator yaitu thallium akan memungkinkan elektron pada *exciton* untuk berpindah ke pita konduksi dan bergerak di dalamnya. Apabila elektron pada pita

konduksi kembali ke keadaan dasar (mengalami deeksitasi) akan diikuti dengan proses pendar cahaya.

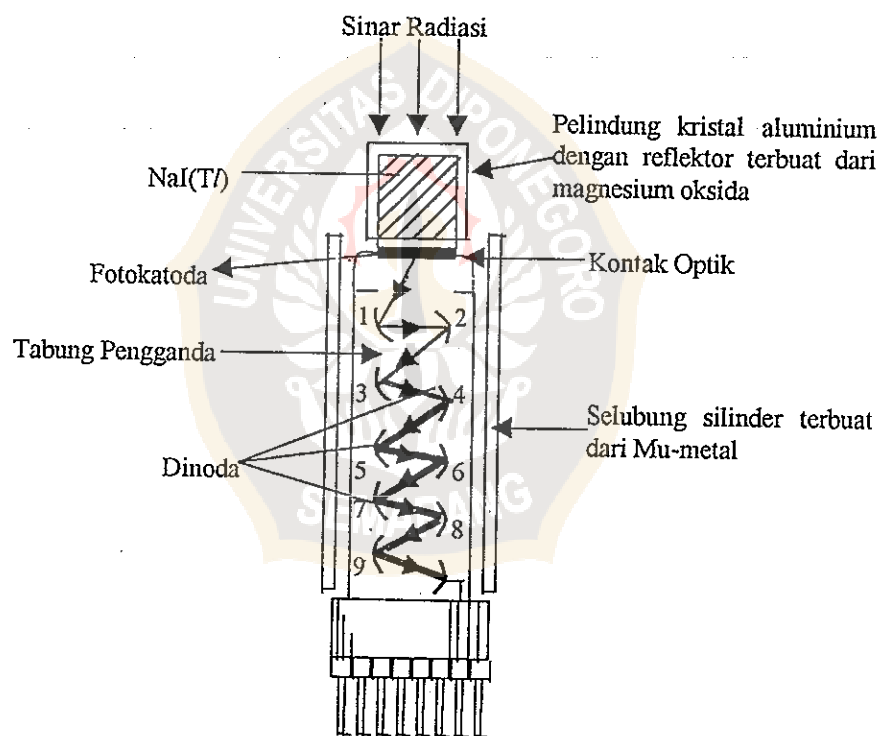
Dengan reflektor, sebagian besar cahaya tersebut akan diteruskan ke fotokatoda pada PMT. Pada fotokatoda, cahaya dari sintilator akan diubah menjadi elektron oleh fotokatoda. Elektron tersebut akan difokuskan dan dipercepat menuju dinoda pertama. Selama gerakannya menuju dinoda pertama, elektron tersebut mendapatkan tambahan energi gerak karena adanya medan listrik terpasang antara fotokatoda dan dinoda pertama. Kemudian elektron menumbuk elektron yang ada di dinoda pertama dan dalam proses tumbukan akan dilepaskan elektron-elektron lain.

Elektron-elektron yang telah diperbanyak jumlahnya yang keluar dari dinoda pertama akan dipercepat menuju dinoda kedua sehingga akan menghasilkan elektron lebih banyak lagi. Demikian seterusnya, sehingga sejumlah besar elektron dengan muatan Q terkumpul di anoda dan cukup menimbulkan sebuah pulsa listrik. Pulsa tersebut akan dilewatkan melalui penguat awal dan kemudian diperbesar pulsanya oleh penguat linier sehingga siap untuk dianalisa tinggi pulsanya.

2.2.2. Tabung Pengganda Elektron (PMT) (Knoll, 1979)

Tabung pengganda elektron terdiri dari dua bagian yaitu fotosensitif (fotokatoda) dan bagian pengganda elektron (dinoda-dinoda). Bagian pengganda elektron berupa tabung gelas yang dihampakan bagian dalamnya. Pada bagian ujungnya, berlaku sebagai katoda yang terdiri dari dinding gelas yang dilapisi

material yang sensitif terhadap sinar ultraviolet, sinar tampak dan sinar infra merah. Fotokatoda berfungsi untuk mengubah foton cahaya yang datang menjadi energi kinetik elektron. Elektron ini kemudian digandakan oleh dinoda-dinoda sehingga dapat menghasilkan faktor penguatan 10^7 - 10^{10} elektron. Kemudian muatan elektron ini terkumpul pada anoda yang keluarannya sebanding dengan jumlah intensitas γ yang masuk. Bila cahaya masuk PMT, maka akan memberikan tanggapan setelah selang waktu 20-50 ns.



Gambar 2.6. Detektor sintilasi NaI(Tl) (modifikasi dari Knoll, 1979)

2.2.3. Dinoda Pengganda Elektron (Knoll,1979)

Bagian pengganda elektron pada tabung PMT, bekerja berdasar atas adanya elektron sekunder. Elektron dari fotokatoda dipercepat menuju dinoda pertama tabung PMT. Energi elektron yang datang cukup untuk membebaskan lebih dari satu elektron. Untuk pelepasan satu elektron pada dinoda memerlukan energi paling sedikit sama dengan lebar pita energi yaitu $\pm 2-3$ eV sehingga elektron yang meninggalkan fotokatoda dengan energi 1 keV akan dapat membentuk kira-kira 30 elektron bila dipercepat dengan memasang tegangan dinoda 100 V. Karena gerakan elektron tersebut tidak lurus, maka ada elektron yang dibebaskan sebagai elektron sekunder. Faktor penggandaan elektron untuk satu tingkat dinoda adalah

$$\delta = \frac{\text{Jumlah elektron sekunder yang terbebaskan}}{\text{Elektron primer yang datang}} \quad (2.12)$$

Untuk dinoda yang terbuat dari BeO, MgO atau CsSb penggandaan dapat mencapai nilai 10 untuk energi yang datang sebesar 1 keV, namun rata-rata nilai δ tersebut kira-kira 4-6 untuk tegangan beberapa ratus volt.

Jika α dan δ konstan maka untuk n dinoda faktor penggandaannya menjadi :

$$M = \alpha(\delta)^n \quad (2.13)$$

dengan:

n = jumlah dinoda

α = fraksi fotoelektron yang terkumpul

Nilai α tergantung pada faktor geometri dan δ tergantung pada tegangan yang terpasang diantara dua dinoda dan materi pembuat dinoda tersebut. Multiplikasi total tabung pengganda elektron tersebut sangat sensitif terhadap tegangan terpasang. Karena δ merupakan fungsi linier tegangan antar dinoda, maka untuk 10 tingkat dinoda faktor multiplikasi total akan sebanding dengan tegangan antar dinoda tersebut. Apabila k adalah suatu konstanta, faktor multiplikasi tersebut adalah :

$$M = kV^{10} \quad (2.14)$$

dengan:

M = faktor penggandaan elektron

k = konstanta penggandaan (V^{-10})

V = tegangan (V)

Untuk suatu tenaga gamma E_γ , akan diperoleh puncak fotopeak yang besar amplitudonya sebanding dengan faktor multiplikasi tersebut. Jadi amplitudo sinyal keluaran detektor tersebut akan sebanding dengan V^{10} dan k_1 adalah suatu konstanta sehingga besarnya amplitudo sinyal keluaran tersebut adalah :

$$A = k_1 V^{10} \quad (2.15)$$

Dengan perubahan tegangan tinggi terpasang tersebut maka besar amplitudo sinyal keluaran tabung pengganda tersebut akan berubah pula.

2.3. Detektor NaI(Tl)

2.3.1. Gambaran Fisik Detektor NaI(Tl) (Susetyo,1988)

Detektor NaI (Tl) terbuat dari kristal tunggal natrium iodida yang bersifat higroskopis, untuk itu kristal tersebut ditutup rapat-rapat dalam wadah aluminium yang biasanya dilapisi dengan kromium. Dalam wadah aluminium itu kristal NaI (Tl) dibungkus dengan reflektor yang biasanya adalah serbuk mangan oksida (MgO) atau aluminium trioksida (Al_2O_3) dan kemudian direkatkan pada sebuah tabung pelipat ganda elektron (*Photo Multiplier Tube*) menggunakan perekat bening yang terbuat dari silikon. Ini dimaksudkan agar kelipan cahaya yang dihasilkan sintilator dapat masuk secara efektif ke dalam tabung pelipat ganda foton tersebut. Biasanya kristal NaI(Tl) dibuat dalam bentuk silinder dan ukurannya bermacam-macam tergantung keperluan.

2.3.2 Kelebihan dan Kekurangan Detektor NaI(Tl)

Detektor sebagai alat deteksi juga memiliki kelebihan dan kekurangan, begitu pula dengan detektor NaI (Tl).

Kelebihan-kelebihan detektor ini antara lain (Alex, 1970) :

1. Efisiensi deteksi yang tinggi.

Untuk kristal anorganik, efisiensinya mencapai 20 % untuk partikel α , β , γ , p. Untuk kristal organik, efisiensinya 10 % untuk γ dan 1 % untuk α dan p.

2. Waktu bangkit dan waktu pulih yang singkat.

Untuk Kristal anorganik, waktu bangkit dan waktu pulihnya sekitar $1\mu\text{s}$.

Untuk kristal organik waktu bangkit dan pulihnya sekitar 10 ns.

3. Ringan, sehingga detektor ini mudah dibawa kemana-mana.

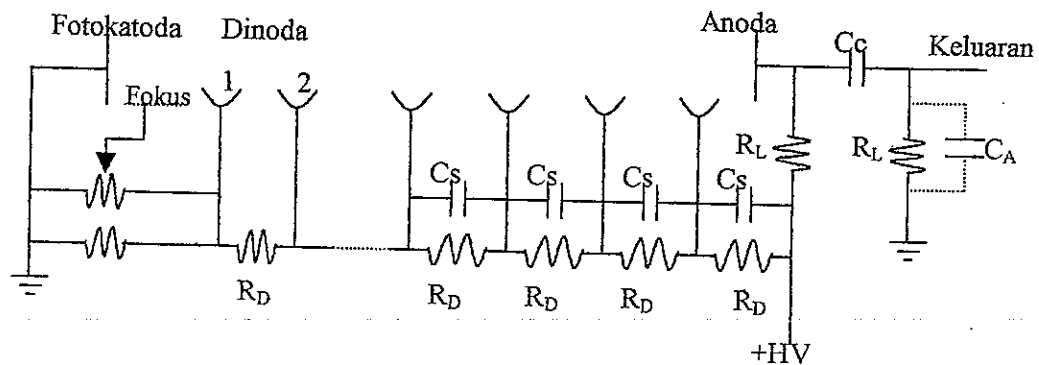
Kekurangan detektor ini adalah (Tsoulfanidis, 1983) :

1. Resolusinya rendah (sekitar 6%).
2. Sensitif terhadap panas dan kenaikan tegangan yang tiba-tiba. Detektor ini akan lebih cepat rusak apabila terjadi kenaikan tegangan yang tiba-tiba dan kenaikan temperatur yang semakin tinggi.
3. Sintilator bersifat higroskopis (mudah menyerap air)

2.4. Penyedia Tegangan Tinggi dan Pembagi Tegangan

Sumber tegangan tinggi harus dihubungkan dengan PMT sehingga dinoda akan mengalami tingkat penggandaan antara satu dengan yang lainnya. Karena elektron pada fotokatoda harus ditarik ke dinoda maka dinoda pertama harus diberi tegangan positif. Untuk pengumpulan fotoelektron yang cukup maka tegangan antara fotokatoda dan dinoda-dinoda berikutnya akan terjadi kenaikan beda tegangan. Pada prinsipnya PMT memerlukan perbedaan tegangan pada dinoda-dinodanya.

Beda tegangan biasanya dihasilkan dari sumber tegangan tinggi tunggal dan pembagi tegangan resistif. Dalam gambar 2.7 diberikan dasar dari penyusunan PMT dengan menggunakan polaritas tegangan tinggi positif.



Gambar 2.7. Skema rangkaian PMT (Modifikasi dari Knoll, 1979)

Katoda dari PMT ini ditanahkan, dan untai pembagi memberi tegangan positif pada tiap-tiap dinoda dan menggandakannya. Tegangan tinggi dipasang pada anoda dan sinyal keluaran diambil dari anoda dengan suatu kapasitansi agar tegangan tinggi dc tidak lewat. Kapasitansi yang dipasang pada anoda atau C_A merupakan kapasitansi tambahan yang dihubungkan dengan anoda dan kabel penghubung sebagai *blocking capacitor*.

Tegangan dc yang melalui kawat pembagi akan diperoleh dengan membandingkan tegangan tinggi yang digunakan dengan jumlah seluruh resistor di kawat pembagi. Hal ini digunakan untuk menjaga agar arus tetap minimum. Arus yang kecil akan memperkecil panas yang timbul pada resistor pembagi, namun arus kawat pembagi harus tetap besar apabila dibandingkan dengan arus PMT internal akibat adanya radiasi, agar tegangan pada dinoda tetap konstan. Arus ini biasanya tersimpan pada kapasitor *stabilising* atau C_s yang berfungsi sebagai arus masukan ke dinoda. Kapasitor *stabilising* memberikan arus yang hilang dari dinoda selama pembentukan pulsa dan kemudian diisi kembali oleh pembagi arus selama selang waktu pembentukan pulsa. Ini dimaksudkan untuk mencegah perubahan tegangan yang lebih besar dari 1% antar dinoda dan muatan

yang disimpan pada kapasitor *stabilising* (diberikan oleh hasil nilai kapasitansi dan tegangan antar dinoda) harus 100 kali lebih besar daripada muatan yang terpancar oleh dinoda.

Dengan menganggap ada 1000 fotoelektron yang dilepaskan dari fotokatoda dan PMT mempunyai faktor multiplikasi total sekitar 10^6 sampai 10^9 elektron per pulsa meninggalkan dinoda terakhir dan terkumpul pada anoda. Pulsa sintilasi ini biasanya terjadi pada 10^5 per sekon dan rata-rata arus anoda dc dapat dihitung sebagai berikut:

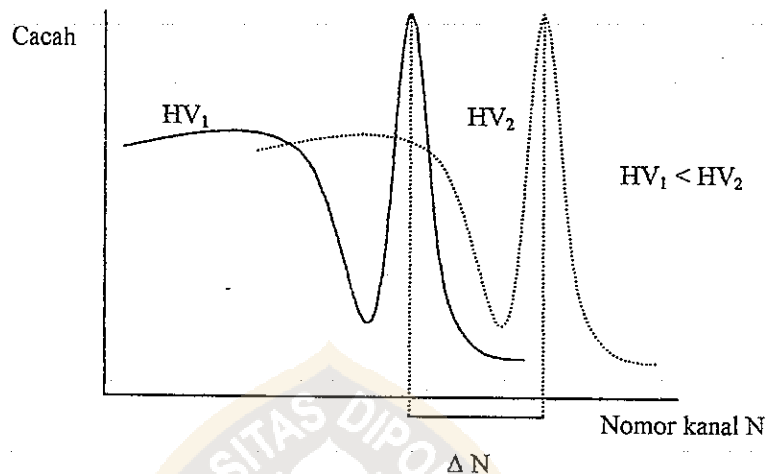
$$\begin{aligned} I_{avg} &= 10^9 \frac{\text{elektron}}{\text{pulsa}} \times 1,6 \times 10^{-19} \frac{\text{Coulomb}}{\text{elektron}} \times 10^5 \frac{\text{pulsa}}{\text{detik}} \\ &= 1,6 \times 10^{-5} \text{ A} = 0,016 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Ujung fotokatoda ditanahkan, hal ini diperlukan untuk penerapan tegangan positif pada ujung anoda. Karena gain PMT sensitif terhadap perubahan tegangan sehingga sumber tegangan harus diatur dengan baik dan bebas dari riak (*ripple*). Jika variasi tegangan cukup besar akan memberi tanggap yang kurang baik terhadap resolusi energi pada detektor sintilasi.

2.5. Hubungan Spektrum Energi dengan Tinggi Amplitudo

Ketika detektor NaI(Tl) dikenai sinar- γ , amplitudo yang dihasilkan oleh detektor dan penguat sebanding dengan energi sinar- γ . Seperti terlihat pada spektrum energi- γ puncak, fotolistrik biasa dipakai sebagai ukuran tenaga- γ . Dengan tegangan tinggi terpasang tertentu, bentuk spektrum sinar- γ akan bergantung pada tenaganya sehingga akan terjadi puncak fotolistrik yang tingginya (posisi nomor kanal) berbanding langsung terhadap besar energinya.

Seperti diketahui bahwa faktor multiplikasi tabung pengganda elektron itu bergantung pada tegangan terpasang yang dipakai sehingga spektrum energi- γ tertentu akan bergeser apabila tegangan tinggi terpasang divariasi. Hal ini digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.8. Pergeseran nomor kanal akibat variasi tegangan

Amplitudo dengan tinggi diantara batas-batas tertentu yang cukup sempit dikumpulkan dalam suatu alamat tertentu pada sederetan memori bernomor urut yang sering disebut salur kanal sehingga nomor salur atau nomor kanal juga akan sebanding dengan energi sinar- γ (Pudjijanto, 1997).

Energi sinar- γ yang datang kemudian diubah menjadi pulsa tegangan. Hal ini merupakan fluktuasi statistik dari elektron itu sendiri karena pulsa tegangan listrik yang dihasilkan dari tabung pengganda elektron adalah akibat dari pengumpulan muatan elektron yang dihasilkan anoda pada permukaan kapasitor. Dengan melihat pulsa amplitudo keluaran maka memungkinkan untuk menentukan energi radiasi yang terdeteksi (Susetyo, 1988).