BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tenaga Sinar-γ

Sinar-γ adalah radiasi gelombang elektromagnetik yang dapat pula ditinjau sebagai paket-paket catu tenaga yang dinamakan foton. Apabila sinar-γ berinteraksi dengan materi maka tenaganya akan diserahkan pada atom-atom materi yang dilalui **(Krane, 1992)**.

Suatu sinar-γ yang bertenaga tunggal menghasilkan spektrum berbentuk satu garis lurus. Sedangkan kenyataannya puncak spektrum-γ tidak berbentuk garis lurus melainkan terjadi pelebaran simetris sehingga berbentuk suatu fungsi Gauss. Hal ini disebabkan karena bermacam-macam peristiwa yang dialami, mulai dari pembentukan pulsa hingga pada proses analisis tinggi pulsa yang merupakan suatu proses acak (random). Dalam penelitian yang dilakukan menggunakan sumber Cs^{137} dengan energi sinar-γ sebesar 662 keV dan Mn^{54} dengan energi sinar-γ sebesar 835 keV sehingga untuk tenaga sinar-γ besar dari 100 keV kemampuan detektor untuk memisahkan puncak fotolistrik menjadi berkurang.

2.2. Interaksi Sinar -γ dengan Materi

Spektrum sinar-γ terbentuk sebagai hasil interaksi antara sinar-γ dengan detektor. Interaksi sinar-γ dengan materi bisa terjadi melalui bermacam-macam proses.

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)

2.2.1. Efek fotolistrik

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

$$\mathbf{E_k = h\nu - E_b} \qquad (2.1)$$

dengan :

E = hν, adalah energi foton (J)

E_k = energi kinetik elektron (J)

E_b = energi ikat elektron (J)

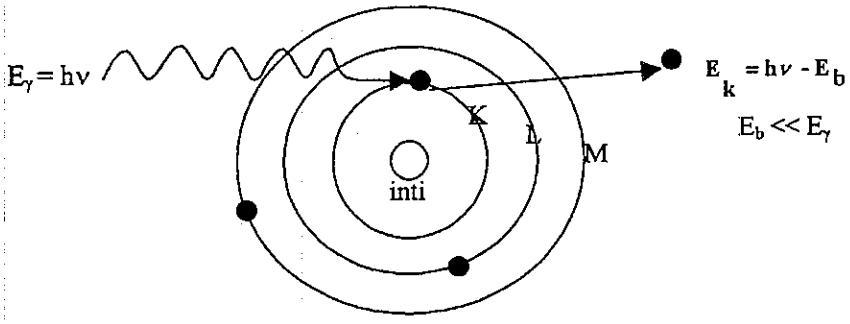
h = Tetapan Planck = $6{,}62618 \times 10^{-34}$ Js

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

Nilai energi ikat elektron ordenya sekitar beberapa keV sehingga energi ikat elektron akan jauh lebih kecil dari energi foton.

Efek fotolistrik secara skematis dapat digambarkan sebagai berikut :

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)

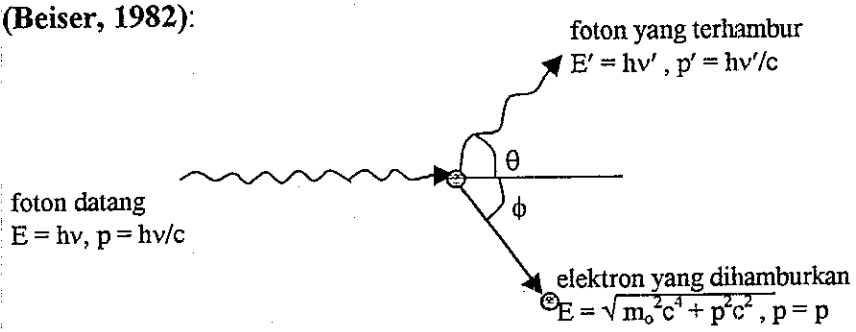


Gambar 2.1. Efek fotolistrik **(Susetyo, 1988)**

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

2.2.2. Hamburan Compton

Apabila foton menumbuk sebuah elektron bebas pada kulit terluar sebuah atom maka berdasarkan hukum kekekalan momentum tidak mungkin elektron akan dapat menyerap seluruh energi foton seperti pada efek fotolistrik. Foton akan menyerahkan sebagian energinya kepada elektron dan kemudian terhambur sebesar sudut θ terhadap arah gerak foton datang (E_γ) yang digambarkan sebagai berikut **(Beiser, 1982)**:



Gambar 2.2. Hamburan Compton **(Beiser,1982)**

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)

Energi sinar-γ terhambur hν′, yang terhambur dengan sudut θ adalah sebagai berikut (**Knoll, 1979**):

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2}(1 - \cos\theta)} \tag{2.2}$$

dengan $m_o c^2$ adalah energi diam elektron (0,511 MeV). Energi kinetik elektron terhambur adalah

$$E_k = h\nu - h\nu' = h\nu\left[\frac{\frac{h\nu}{m_0 c^2}(1 - \cos\theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2}(1 - \cos\theta)}\right] \tag{2.3}$$

Jika $\theta \cong 0$, maka $h\nu' \cong h\nu$ dan $E_k \cong 0$ akan menyebabkan elektron Compton energinya menjadi kecil dan sinar-γ terhambur mempunyai energi sama dengan energi sinar-γ datang. Untuk $\theta = \pi$, akan menyatakan energi maksimum yang dipindahkan ke elektron pada interaksi Compton sehingga hν′ dan E_k akan menjadi:

$$h\nu'_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + 2\frac{h\nu}{m_0 c^2}} \tag{2.4}$$

$$E_{k\ \theta=\pi} = h\nu\left[\frac{2h\nu / m_0 c^2}{1 + 2h\nu / m_0 c^2}\right] \tag{2.5}$$

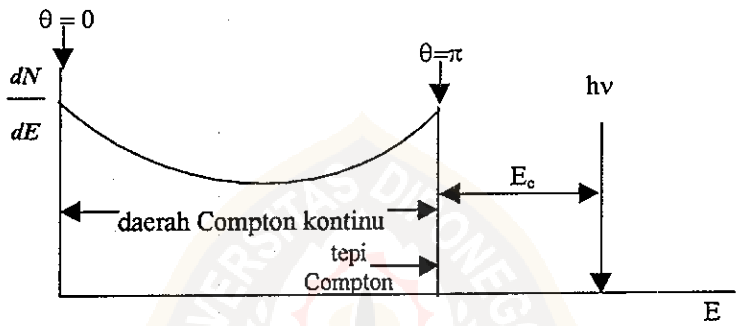
dengan m_o adalah massa elektron diam dan c adalah laju cahaya.

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)

Daerah Compton berkisar dari θ = 0 sampai titik maksimum yaitu saat θ = π. Selisih antara energi elektron compton maksimum dengan sinar-γ datang dirumuskan

$$E_c \equiv h\nu - E_{k\ \theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + 2h\nu / m_0 c^2} \qquad (2.6)$$

Distribusi energi elektron Compton dapat digambarkan sebagai berikut :



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

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

$$E_c \cong \frac{m_0 c^2}{2} (= 0{,}256\ \text{MeV}) \qquad (2.7)$$

Dari proses hamburan Compton diperoleh elektron yang mempunyai energi kinetik yang besarnya antara 0 sampai (E_γ - 0,256) MeV yang terdistribusi secara kontinu sehingga akan menimbulkan tanggapan spektrum yang kontinu pula (**Knoll,1979**).

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. Detektor Sintilasi NaI(T*l*)

Ada bermacam-macam detektor sintilator yang dapat dipakai untuk mendeteksi zarah α dan β maupun sinar-γ. Dalam spektrometri-γ, detektor yang paling sering digunakan adalah yang terbuat dari kristal tunggal natrium iodida yang telah "dikotori" dengan sedikit talium. Detektor jenis ini dikenal dengan nama detektor NaI(T*l*).

Kristal NaI(T*l*) mempunyai diameter dengan ukuran 0,75 meter dan ketebalan 0,25 meter serta mempunyai densitas 3,67 x 10^3 kg/m^3. Emisi panjang gelombang maksimum kristal ini sebesar 410 nm dan efisiensi sintilasi sebesar 100 %, mempunyai struktur kristal fcc (*face centered cubic*). Thallium (T*l*) merupakan pengotor kristal dan berfungsi sebagai pengaktif proses pendar cahaya.

Pendar cahaya ini terjadi bila kristal NaI(T*l*) dikenai radiasi. Peristiwa pemancaran cahaya disebut sintilasi sedangkan bahannya disebut sintilator. Sintilator dibedakan menjadi dua macam yaitu sintilator organik dan anorganik. Contoh sintilator anorganik adalah NaI(T*l*), CsI(T*l*) dan ZnS(Ag) **(Tsoulfanidis, 1983)**.

Di dalam detektor sintilasi, pendar cahaya merupakan gejala yang mewakili informasi fisis radiasi. Untuk itu diperlukan detektor sintilasi NaI(T*l*) ideal yang 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.

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. 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.

Tenaga sinar-γ yang diserap akan dilepaskan dalam bentuk tenaga panas dan kelipan foton cahaya. Proses terbentuknya kelipan cahaya terjadi melalui dua proses yaitu ***flouresensi*** yang terjadi apabila elektron menyerap tenaga dan tereksitasi, lalu langsung kembali ke keadaan dasar atau bisa juga melalui keadaan metastabil. Deeksitasi ini terjadi dalam waktu yang sangat singkat yaitu kurang dari 10^{-8} detik. Proses kedua adalah ***fosforesensi*** yang 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 dalam selang waktu 10^{-8} detik **(Knoll, 1979)**.

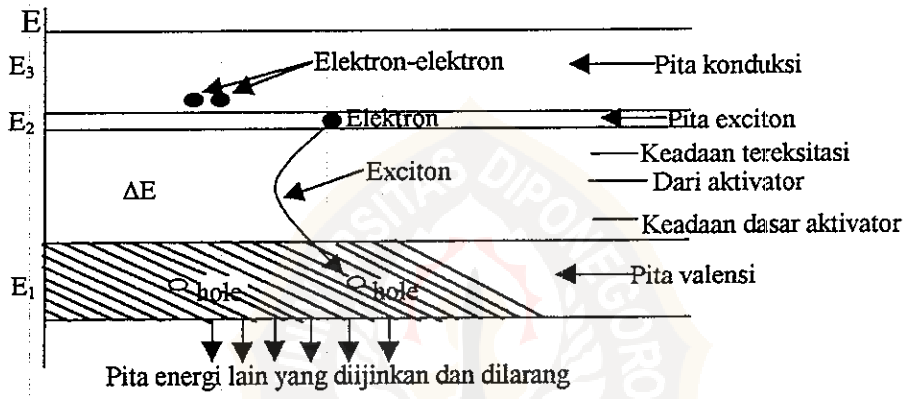
2.3.1. Mekanisme kerja detektor sintilasi NaI(T*l*)

Sinar-γ yang masuk ke dalam detektor NaI(T*l*) akan berinteraksi dengan atom-atom di dalamnya menurut efek fotolistrik dan hamburan Compton. Melalui

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)

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). Sinar-γ yang datang akan mengeksitasi sintilator kemudian deeksitasi sambil memancarkan pendar cahaya. Hal ini dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.4. Tingkat energi pada kristal NaI(T*l*)
(dimodifikasi dari Tsoulfanidis, 1983)

Elektron pada suatu atom menempati tingkat energi yang sudah tertentu. Tingkat energi ini bersifat diskrit. Elektron-elektron valensi atom-atom dalam kristal terdapat dalam pita tenaga atau pita valensi. Pita tenaga lainnya yang kosong dinamakan pita konduksi. Antara pita valensi dan pita konduksi terjadi rumpang 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*. Kadang kala energi yang mengenai elektron tidak cukup untuk

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)

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 pita 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 tesebut akan diteruskan ke fotokatoda pada PMT. Pada fotokatoda, cahaya dari sintilator akan diubah menjadi elektron yang kemudian 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 dianalisis tinggi pulsanya **(Tsoulfanidis, 1983)**.

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)

2.3.2. Tabung Pengganda Elektron (PMT)

Dalam tabung pengganda elektron terjadi proses fotoemisi yaitu aliran elektron yang disebabkan oleh foton yang mengenai katoda. Proses emisi ini terdiri dari dua tingkatan yaitu foton diserap dan energinya diberikan ke elektron menjadi tenaga gerak elektron kemudian pelepasan elektron dari permukaan fotokatoda. 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 elektron yang mempunyai suatu energi kinetik. Elektron ini kemudian ditarik dan digandakan oleh adanya tegangan terpasang pada dinoda sehingga dapat menghasilkan faktor penggandaan 10^7 sampai 10^{10} elektron. Muatan elektron ini terkumpul pada anoda yang keluarannya sebanding dengan E_γ yang masuk. Bila cahaya masuk PMT, maka akan memberikan tanggapan setelah selang waktu 20 sampai 50 ns.

Energi yang berpindah dari foton ke elektron diberikan dalam bentuk energi kuantum foton sebesar hv. Besarnya energi ini harus cukup untuk melepaskan elektron dari bahan fotokatoda sehingga dipasang fotokatoda yang bersifat semikonduktor yang mempunyai fungsi kerja sebesar 1,5 sampai 2 eV **(Knoll, 1979)**.

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)

2.3.3. Dinoda Pengganda Elektron

Bagian pengganda elektron pada tabung PMT, bekerja berdasarkan 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 2 sampai 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 volt. Elektron-elektron yang terbebaskan disebut sebagai elektron sekunder. Faktor penggandaan elektron untuk satu tingkat dinoda adalah

$$\delta = \frac{\textbf{Jumlah elektron yang terbebaskan}}{\textbf{Elektron primer yang datang}} \tag{2.8}$$

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 kira-kira 4 sampai 6 untuk tegangan beberapa ratus volt.

Dalam tabung pengganda elektron, terjadi penggandaan yang bergantung pada jumlah tingkat dinoda yang dipakai. Untuk n dinoda, penggandaan total adalah:

$$\mathbf{M} = \alpha(\delta)^n \tag{2.9}$$

dengan:

n = jumlah dinoda

α = fraksi fotoelektron yang terkumpul di dinoda pertama

δ = faktor emisi elektron sekunder.

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)

Nilai α tergantung pada faktor geometri dan δ tergantung pada tegangan yang terpasang di antara dua dinoda dan materi pembuat dinoda tersebut. Untuk material dinoda konvensional, nilai δ adalah = 5, sedang nilai α mendekati 1. Penggandaan total suatu tabung pengganda elektron sangat sensitif terhadap tegangan terpasang karena δ merupakan fungsi linier tegangan antar dinoda, maka untuk 10 tingkat dinoda faktor penggandaan total akan sebanding dengan tegangan antar dinoda tersebut, apabila k adalah suatu konstanta maka faktor penggandaan tersebut adalah:

$$\mathbf{M = k\,V^{10}} \qquad (2.10)$$

dengan:

M = faktor penggandaan elektron

k = konstanta

V = tegangan (volt)

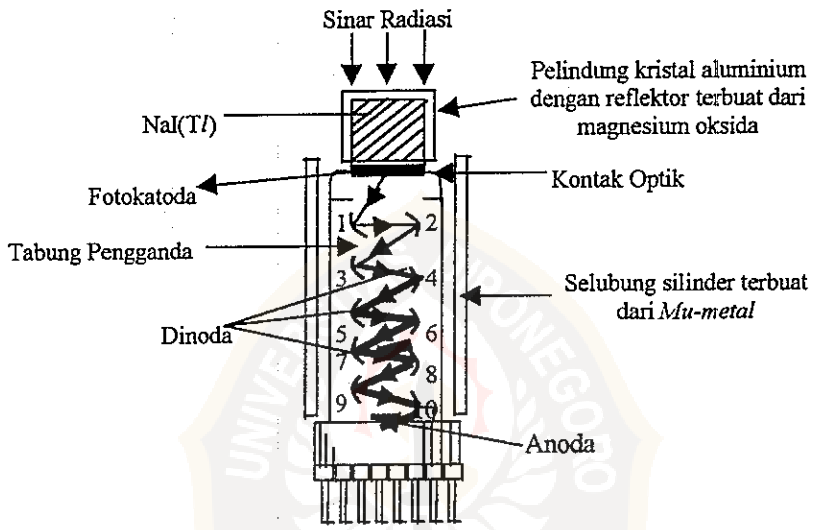
Tabung pengganda elektron biasanya mempunyai 10 tingkat dinoda dan faktor penggandaannya sekitar 10^7 sampai 10^8 kali **(Knoll, 1979)**.

2.3.4. Gambaran fisik detektor NaI(T*l*)

Detektor NaI(T*l*) terbuat dari kristal tunggal natrium iodida yang bersifat higroskopis (mudah menyerap air), untuk itu kristal tersebut ditutup rapat-rapat dalam wadah aluminium yang biasanya dilapisi dengan kromium. Dalam wadah aluminium itu kristal NaI(T*l*) 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***)

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)

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(T*l*) dibuat dalam bentuk silinder dan ukurannya bermacam-macam tergantung keperluan. Pada gambar berikut disajikan gambaran fisik detektor natrium iodida dengan pengotornya talium **(Tsoulfanidis, 1983)**.



Gambar 2.5. Detektor Sintilasi Natrium Iodida dengan pengotornya Talium **(Modifikasi dari Arya, 1966)**

2.3.5. Kelebihan dan kekurangan detektor NaI(T*l*)

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

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

1. Efisiensi deteksi yang tinggi.

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

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. Waktu bangkit dan waktu pulih yang singkat.

   Untuk Kristal anorganik, waktu bangkit dan waktu pulihnya sekitar 1μs. 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)** :

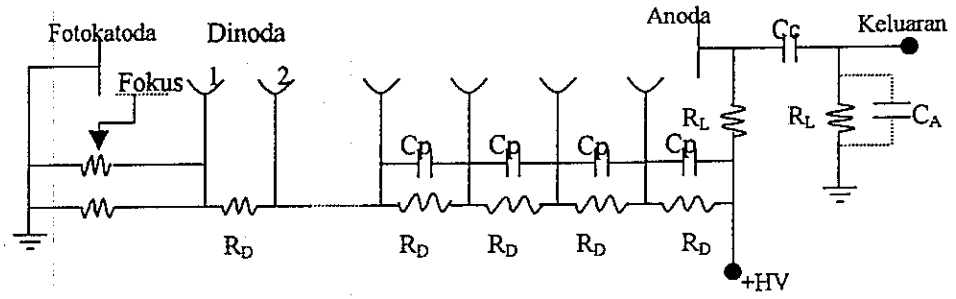
1. Resolusinya rendah (sekitar 6%).
2. Sensitif terhadap panas dan kenaikan tegangan yang tiba-tiba. Detektor ini akan lebih cepat rusak apabila terjadi kenaikan tegangan yang tiba-tiba dan kenaikan temperatur yang semakin tinggi.
3. Sintilator bersifat higroskopis (mudah menyerap air)

2.4. Penyedia tegangan tinggi dan pembagi tegangan

Sumber tegangan tinggi harus dihubungkan dengan PMT dimana 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 kenaikkan 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 2.6 diberikan dasar dari penyusunan PMT dengan menggunakan polaritas tegangan tinggi positif.

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)



Gambar 2.6. 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 capasitor*.

Tegangan dc melalui kawat pembagi ditentukan dengan perbandingan tegangan tinggi yang digunakan dan 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 Cp 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 muatannya disimpan pada kapasitor

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)

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 foto elektron yang dilepaskan dari fotokatoda dan PMT mempunyai penggandaan 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:

$$\mathbf{I}_{avg} = 10^9 \frac{elektron}{pulsa} \mathbf{x}\, 1{,}6\mathbf{x}10^{-19} \frac{Coulomb}{elektron} \mathbf{x}\, 10^5 \frac{pulsa}{\mathbf{det}\, ik} \qquad (2.11)$$

$$= \mathbf{1{,}6 \times 10^{-5}\ A = 0{,}016\ mA}$$

Ujung fotokatoda ditanahkan, hal ini diperlukan untuk penerapan tegangan positif pada ujung anoda. Karena penguatan 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 **(Knoll, 1979)**.

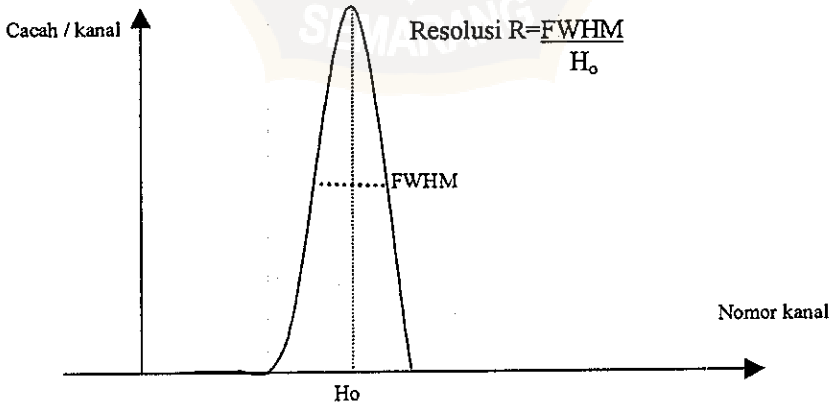
2.5. Resolusi

Kemampuan suatu detektor spektrometri-γ untuk memisahkan dua puncak tenaga-γ yang berdekatan disebut *daya pisah* atau *resolusi* detektor yang ukuran daya pisahnya dinyatakan dengan *lebar setengah tinggi maksimum* atau disebut dengan **FWHM** (***Full Width Half Maximum***) dalam satuan keV. Daya pisah suatu detektor adalah fungsi tenaga sinar-γ, semakin tinggi tenaga-γ makin rendah daya pisah detektor atau makin lebar FWHMnya **(Susetyo,1988)**.

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)

Resolusi energi adalah kemampuan untuk membedakan pulsa yang disebabkan oleh sinar-γ dari energi yang berbeda-beda. Metoda sederhana untuk memeriksa resolusi adalah dengan menentukan lebar dari FWHM. Puncak yang semakin sempit maka resolusi semakin baik. Dengan kata lain dari resolusi adalah resolusi energi atau kemampuan sistem *imaging* (pencitraan) untuk memisahkan dan membedakan fotopuncak yang berbeda. Jika resolusi energi baik, maka puncak fotolistrik yang terlihat akan sempit dan tinggi tetapi jika resolusi energi tidak baik maka fotopuncak yang terlihat akan lebar pada spektrum energinya. FWHM juga digunakan untuk memeriksa resolusi energi untuk energi foton yang relatif tinggi seperti Cs^{137} dengan energinya 662 keV **(Mettler, 1983)**.

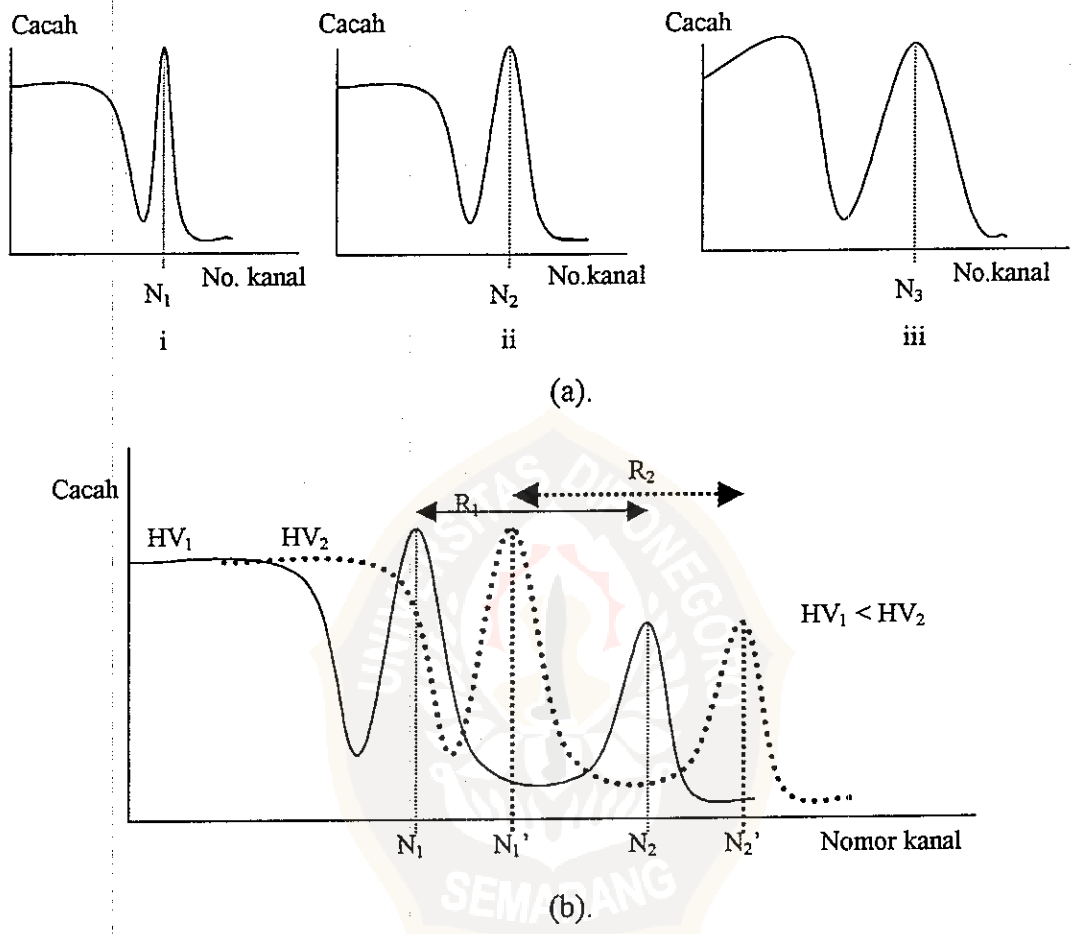
Resolusi energi biasanya dinyatakan dalam persen (%) lebar paroh, yaitu lebar paroh dibanding energi puncak. Atau lebar distribusi pada tingkat yang tingginya setengah tinggi koordinat puncak dibagi dengan letak pusat spektrum (***Full Width Half Maximum/FWHM***) yang digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.7. Spektrum sinar gamma (**Modifikasi dari Knoll, 1979**)

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)

Faktor penggandaan akan lebih besar akibat tegangan terpasang akan mengakibatkan pula pelebaran puncak atau pelebaran resolusi seperti ditunjukkan dalam gambar 2.8.



Gambar 2.8.a. Tanggapan spektrum b. Pergeseran spektrum gamma

Besarnya resolusi relatif yang diukur dengan FWHM berdasarkan distribusi Gauss adalah sebagai berikut **(Knoll, 1979)**:

$$R = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2.35\,K\sqrt{N}}{KN} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \qquad (2.12)$$

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)

N = jumlah muatan yang timbul akibat radiasi sinar-γ dan besarnya akan sebanding dengan amplitudo sinyal keluaran yang bergantung pada tegangan tinggi terpasang dari PMT.

K = konstanta

H_0 = lokasi pusat puncak = KN

Resolusi dirumuskan sebagai berikut :

$$R = \frac{2.35}{\sqrt{K_1 V^{10}}} = \frac{K_2}{V^5} \tag{2.13}$$

Ralat resolusi bila tegangan (V) berubah adalah sebagai berikut :

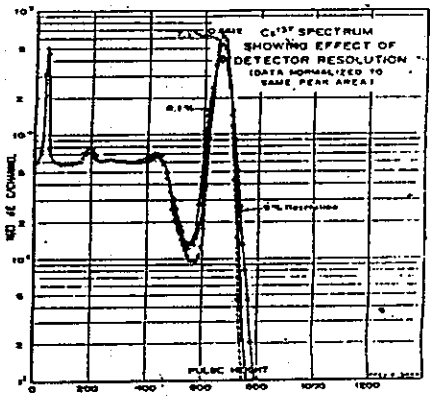
$$S_R = \left|\frac{K_2}{V^6}\right| \tag{2.14}$$

dan untuk ralat relatif resolusinya adalah

$$\frac{S_R}{R} = \frac{\left|\frac{K_2}{V^6}\right|}{\frac{K_2}{V^5}} = \frac{1}{V}\% \tag{2.15}$$

Resolusi detektor NaI(T*l*) biasanya diberikan oleh sinar-γ teremisi Cs^{137} yang besarnya 662 keV. Untuk detektor dengan kristal berukuran 3″x 3″ mempunyai resolusi energi sebesar 7,5 % sampai 8,5 % yang ditunjukkan dalam gambar berikut **(Heath, 1964)**:

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)



Gambar 2.9. Spektrum tinggi pulsa dari efek resolusi detektor
(Heath, 1964)

Gambar 2.9 menunjukkan efek perubahan resolusi pada distribusi amplitudo pulsa. Lebar garis fotolistrik merupakan hasil fluktuasi statistik pada proses pembentukan muatan dalam detektor. Batas lebar dari kanal tinggi pulsa dalam penganalisis pulsa dapat menambah lebar puncak fotolistrik tersebut. Resolusi detektor dapat digunakan untuk menggambarkan suatu bentuk spektrum sebagai fungsi energi sinar-γ **(Heath, 1964)**.

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)