

BAB II

INTERAKSI RADIASI NUKLIR DENGAN MATERI

Radiasi nuklir ada dua jenis yaitu radiasi partikel bermuatan (zarah α , zarah β) dan radiasi partikel tak bermuatan (foton γ , sinar X). Dibandingkan zarah α dan zarah β , maka sinar γ mempunyai daya tembus pada bahan sangat besar. ⁽⁶⁾

II.1. Interaksi Partikel Tak Bermuatan dengan Materi

Partikel tak bermuatan berinteraksi dengan materi akan mengakibatkan adanya beberapa peristiwa, antara lain efek fotolistrik, efek Compton, efek produksi pasangan.

II.1. Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik adalah peristiwa dimana terlepasnya elektron atom akibat materi tersebut terkena radiasi elektromagnetik. Elektron dapat terlepas dari materi karena menyerap seluruh energi dari gelombang elektromagnetik yang datang. Jika sebuah elektron terikat dalam materi dengan energi ikat W yang disebut sebagai fungsi kerja, maka untuk melepaskan sebuah elektron dari permukaan materi diperlukan energi sekurang-kurangnya sebesar W . Jika foton radiasi mempunyai frekuensi (ν) maka besar energi adalah : ⁽⁶⁾

$$E = h \nu \quad (2.1)$$

dengan $h =$ konstanta planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J.S)

Jika $h\nu < W$, maka tidak terjadi efek fotolistrik. Sedangkan bila $h\nu > W$ terjadi efek fotolistrik dengan elektron terpental keluar dan kelebihan energi berubah menjadi energi kinetiknya. Energi kinetik maksimum yang dimiliki elektron pada saat terpental keluar dari permukaan materi adalah :

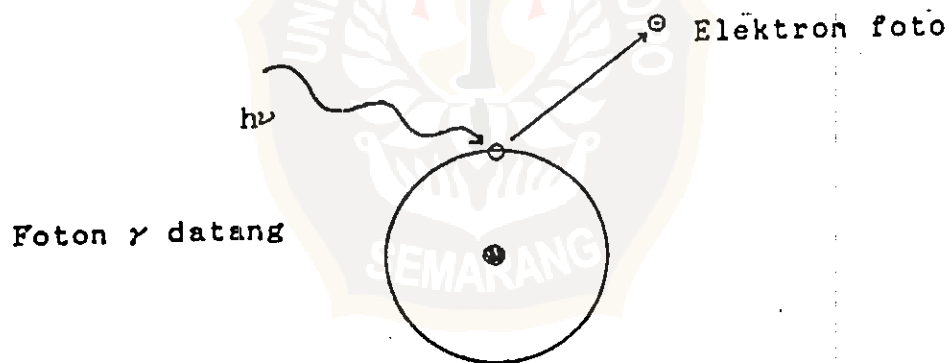
$$K_{maks} = h\nu - W \quad (2.2)$$

dengan

$$W = h \nu_0$$

$\nu_0 =$ frekuensi ambang, yaitu frekuensi terkecil gelombang elektromagnetik yang menyebabkan elektron terlepas.

Secara skematis peristiwa efek fotolistrik dapat ditunjukkan pada gambar (2.1).



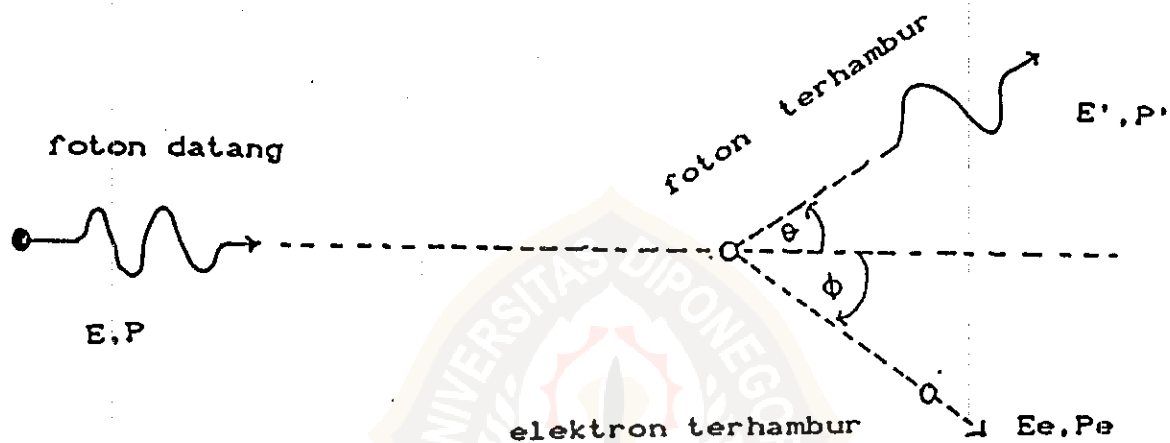
Gambar 2.1. Efek Fotolistrik

II.1.2. Efek Compton

Dalam peristiwa efek Compton energi radiasi yang datang dihamburkan oleh elektron yang terikat lemah pada atom.

Sebagian energi radiasi diberikan kepada elektron, sehingga terlepas dari atom. Sedangkan energi yang tersisa dihamburkan dengan sudut θ .

Proses hamburan ini dianalisis sebagai suatu interaksi (tumbukan) antara sebuah foton dan sebuah elektron yang dianggap diam. Gambar 2.2 menunjukkan peristiwa efek Compton.



Gambar 2.2. Hamburan Compton

Selisih panjang gelombang foton terhambur dengan panjang gelombang foton datang ialah⁽⁶⁾:

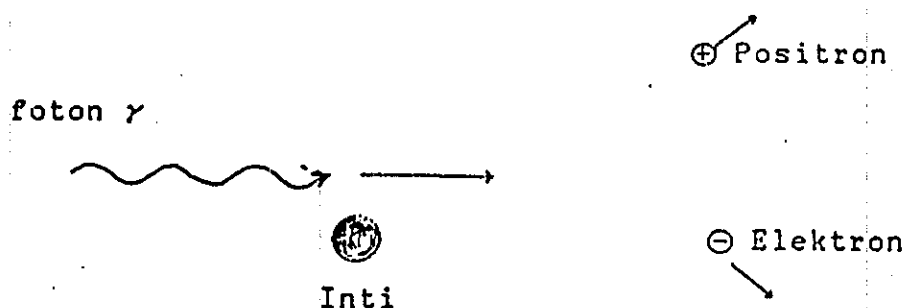
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (2.3)$$

Dengan

- λ = panjang gelombang foton datang
- λ' = panjang gelombang foton terhambur.
- c = kecepatan cahaya ($3 \cdot 10^8$ m/detik)
- m_0 = massa elektron

II.1.3. Efek Produksi Pasangan

Efek produksi pasangan merupakan peristiwa tumbukan antara foton dengan materi, dimana seluruh energi foton hilang dan berubah menjadi dua partikel baru yakni sebuah elektron dan positron. Secara skematis efek produksi pasangan seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Efek Produksi Pasangan

Dalam peristiwa di atas, energi foton berubah menjadi energi elektron dan positron. Secara matematis sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 h \nu_0 &= E^+ + E^- \\
 h \nu_0 &= (m_0 c^2 + K^+) + (m_0 c^2 + K^-) \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

Karena harga K^+ dan K^- selalu positif, maka foton datang harus memiliki energi $\geq 1,02$ MeV agar proses tersebut dapat berlangsung.

Gerak positron akan diperlambat oleh medan listrik elektron dan kemudian akan bergabung dengan elektron. Kedua partikel kemudian hilang dan sebagai gantinya muncul dua foton anihilasi. Kedua foton masing-masing berenergi 0,51 MeV bergerak berlawanan arah.

II.1.4. Sifat Atenuasi Sinar Gamma

Sinar γ jika melintasi materi, maka akan mengalami pengurangan intensitas secara eksponensial, dan dapat dirumuskan sebagai berikut :⁽⁶⁾

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.5)$$

dimana I = intensitas sinar γ yang lolos setelah melalui materi setebal x cm

I_0 = Intensitas sinar γ mula-mula, tepat sebelum memasuki bahan.

μ = koefisien atenuasi

Tebal paruh merupakan sifat tetap (konstanta) bagi suatu bahan. Harganya dapat diturunkan dari harga koefisien atenuasi bahan tersebut. Hal ini ditunjukkan sebagai berikut:

Misal $X_{1/2}$ adalah tebal paruh, pada $X=X_{1/2}$ didapat harga

$$I = 1/2 I_0$$

maka

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$1/2 I_0 = I_0 e^{-\mu x}$$

$$1/2 = e^{-\mu x_{1/2}}$$

$$\ln 1/2 = -\mu x_{1/2}$$

$$X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$X_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} \quad (2.6)$$

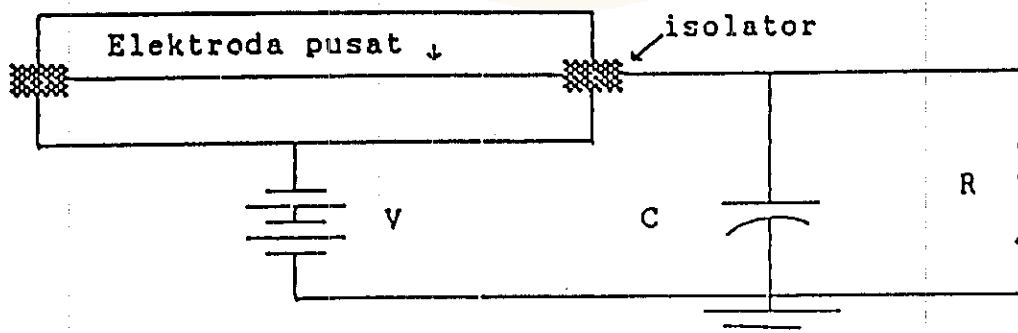
II.2. Detektor Nuklir

Adanya radiasi dapat diketahui setelah radiasi itu berinteraksi dengan suatu bahan. Jika bahan tersebut dibuat menjadi suatu alat yang dapat untuk mendeteksi adanya radiasi, maka alat tersebut dinamakan detektor.

Detektor mempunyai jenis bermacam-macam berdasarkan prinsip kerjanya. Salah satu detektor dari sekian banyak detektor adalah jenis detektor isian gas.

II.2.1. Detektor Isian Gas

Seperti telah diketahui, bahwa radiasi menyebabkan ionisasi pada materi yang dilalui. Detektor isian gas memanfaatkan efek tersebut dalam prinsip kerjanya. Secara sederhana detektor isian gas dapat dijelaskan dengan gambar 2.4.



Gambar 2.4. Detektor Isian Gas

Detektor isian gas terdiri dari katoda berbentuk tabung dan di tengahnya anoda yang berupa kawat. Partikel atau foton radiasi yang masuk akan mengionisasi gas dalam tabung. Medan listrik yang timbul akibat adanya tegangan tinggi antara anoda dan katoda akan menyebabkan ion-ion yang terbentuk bergerak ke arah kutub yang berlawanan dengan muatannya. Ion negatif (elektron) akan bergerak ke arah anoda sedangkan ion positif bergerak ke arah katoda.

Bila tegangan antara anoda dan katoda sama dengan nol, ion positif dan negatif yang terbentuk akan bergabung kembali. Demikian pula jika beda tegangan kecil, sebagian besar ion akan bergabung kembali, sehingga pasangan elektron-ion yang terjadi bergantung kepada kekuatan energi partikel radiasi. Daerah tegangan ini disebut daerah rekombinasi.

Jika tegangan dinaikkan lagi, maka medan listrik menjadi lebih kuat. Elektron akan bergerak menuju anoda, dengan mendapat tambahan energi kinetik dari medan listrik yang ada. Karena energinya cukup, maka elektron akan berhasil mencapai anoda, tetapi belum mampu menimbulkan ionisasi sekunder pada molekul gas yang dilaluinya. Oleh karena itu elektron yang mencapai anoda hanyalah elektron-elektron primer. Daerah tegangan dimana terjadi peristiwa ini disebut daerah ionisasi dan detektor yang bekerja pada daerah tegangan ini disebut kamar ionisasi (*ionization chamber*)

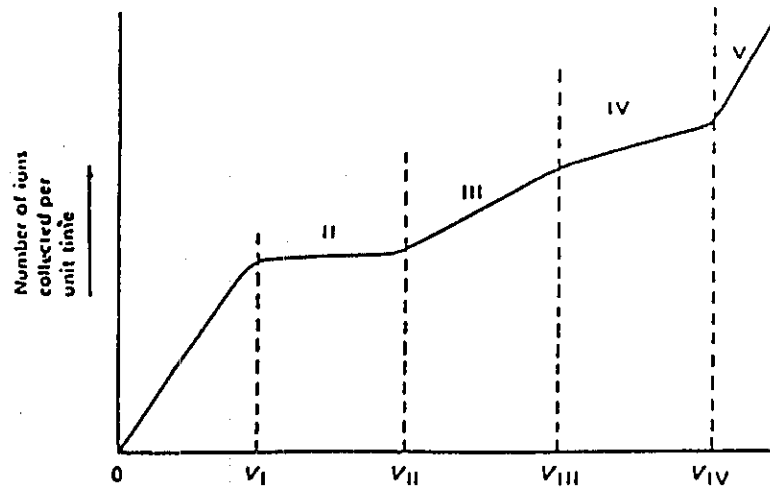
Jika tegangan masih dinaikkan lagi, maka elektron yang dipercepat menuju anoda mempunyai energi sedemikian cepat, sehingga mampu menyebabkan ionisasi sekunder pada molekul gas

yang dilaluinya. Peristiwa ini disebut ionisasi sekunder. Elektron hasil ionisasi sekunder ini menuju ke anoda juga, sehingga jumlah elektron yang sampai anoda bertambah. Tetapi jumlah pelipatan elektron yang sampai anoda ini masih sebanding dengan energi partikel radiasi yang datang. Daerah tersebut dinamakan daerah proporsional, dan detektor yang bekerja pada daerah ini disebut detektor proporsional.

Bila tegangan dinaikkan lagi, elektron - elektron dipercepat, sehingga terjadi proses ionisasi tersier. Dengan demikian terjadi *avalanche* (gugur runtun). Jumlah elektron tidak lagi tergantung kepada energi dan jenis radiasi yang datang, melainkan tergantung pada intensitas sumber radiasi. Detektor hanya merasakan adanya radiasi tanpa bisa membedakan energinya. Daerah tegangan ini disebut daerah Geiger Muller, dan detektor yang bekerja pada daerah ini disebut detektor Geiger Muller.

Pada tegangan yang lebih tinggi dari pada daerah Geiger Muller, energi elektron dan ion positif sedemikian besarnya. Elektron dan ion yang terbentuk sangat banyak. Dengan demikian terjadi proses ionisasi, meskipun tanpa ada partikel yang masuk. Daerah tegangan ini merupakan daerah *discharge*.⁽³⁾

Variasi cacah ion yang terjadi terhadap tegangan ditunjukkan gambar 2.5. ini.



Gambar 2.5. Cacah ion fungsi tegangan operasi

Keterangan:

I. Daerah rekombinasi

Tegangan antara anoda dan katoda belum cukup tinggi, sehingga ion yang terbentuk bergabung kembali. Hanya sedikit yang mencapai anoda.

II. Daerah Ionisasi

Tidak terjadi rekombinasi. Seluruh elektron mencapai anoda.

III. Daerah Proporsional

Terjadi ionisasi sekunder. Jumlah elektron yang sampai di anoda masih sebanding dengan energi partikel radiasi.

IV. Daerah Geiger Muller

Jumlah elektron tidak sebanding dengan energi partikel radiasi.

V. Daerah Discharge

Terjadi ionisasi terus menerus, walaupun tanpa

partikel radiasi yang masuk.

II.2.2. Medan Listrik dalam Tabung Detektor

Dinding tabung detektor yang berbentuk silinder merupakan katoda dan kawat di porosnya merupakan anoda. Jika antara anoda dan katoda terjadi beda tegangan, maka akan timbul medan listrik dalam tabung. Kuat medan listrik yang terjadi dalam tabung detektor tergantung pada besar beda tegangan antara anoda dan katoda, serta panjang jari-jari anoda dan katoda. Kuat medan listrik E pada jarak r dari poros tabung detektor adalah :⁽⁴⁾

$$E(r) = \frac{V(r)}{r \ln b/a} \quad (2.7)$$

V =beda tegangan antara anoda dan katoda

a =jari-jari anoda

b =jari-jari katoda

II.3. Detektor Geiger Muller

Detektor Geiger Muller merupakan detektor yang paling sering digunakan, sebab pengoperasiannya sederhana dan menghasilkan pulsa yang besar orde volt. Pulsa keluaran tidak tergantung pada jenis dan energi radiasi yang masuk ke dalam medium aktif detektor Geiger Muller, tetapi sebanding dengan intensitas radiasinya.

II.3.1. Jenis Detektor Geiger Muller

Berdasarkan cara peredaman terhadap lucutan, detektor Geiger Muller dapat digolongkan dalam dua jenis, yaitu detektor Geiger Muller dengan pemudur dan tanpa pemudur.

II.3.1.1. Detektor Geiger Muller Tanpa Pemudur

Detektor Geiger Muller tanpa pemudur diisi dengan satu jenis gas yaitu gas mulia, misalnya argon, neon, helium, dan sebagainya. Pada detektor jenis ini, proses pelucutan elektron yang terjadi tidak dapat dikendalikan dalam tabung itu sendiri, tetapi dikendalikan dengan suatu rangkaian elektronik yang berada di luar tabung detektor.

II.3.1.2. Detektor Geiger Muller dengan Pemudur

Pada detektor jenis ini, kecuali diisi dengan gas mulia juga dicampurkan sedikit gas polyatom. Gas tersebut berfungsi sebagai pemudur (quencher). Dengan adanya gas pemudur tersebut, maka proses gugur runtun yang terjadi dapat dikendalikan dalam tabung itu sendiri.⁽⁷⁾

II.3.2. Mekanisme Lucutan dalam Tabung Detektor

Pada saat partikel radiasi mencapai medium aktif detektor, maka akan terjadi tumbukan antara partikel radiasi dengan gas isian detektor. Proses tumbukan ini menyebabkan terjadinya ionisasi atom-atom gas isian, sehingga timbul elektron-ion bebas. Elektron hasil ionisasi primer tersebut oleh medan listrik akan dipercepat, sehingga elektron-

elektron tersebut mempunyai energi kinetik yang cukup untuk melanjutkan proses ionisasi terhadap atom-atom gas isian detektor. Proses ionisasi kedua ini dinamakan ionisasi sekunder. Karena masih dalam pengaruh medan listrik maka elektron sekunder dalam lintasannya menuju anoda masih akan mengionisasi atom-atom gas, sehingga terbentuk elektron tersier. Demikian seterusnya sehingga timbul arus elektron yang makin lama makin bertambah besar menuju anoda. Adanya proses berantai inilah yang menyebabkan terjadinya lucutan muatan (*discharge*) di sepanjang kawat anoda.

II.3.3. Mekanisme Kerja Detektor Geiger Muller dengan Isian Gas Neon, Argon dan Bromine

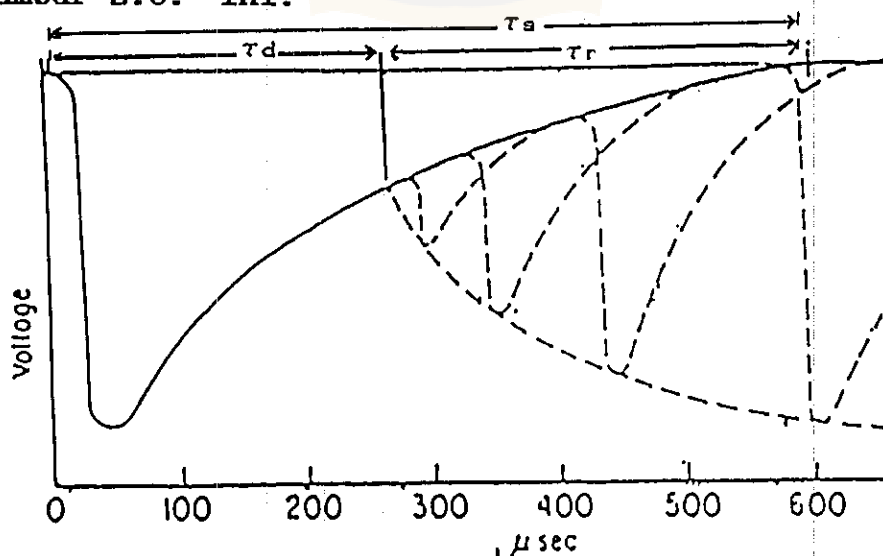
Mekanisme pembentukan pulsa pada detektor adalah sebagai berikut; radiasi yang masuk ke dalam medium aktif detektor akan menyebabkan gas Neon dalam keadaan metastabil dan terjadi ionisasi gas Argon, sehingga timbul pasangan elektron ion primer. Karena pengaruh medan listrik antara anoda dan katoda, elektron yang dihasilkan dalam proses ionisasi primer akan bergerak menuju anoda, sedangkan ion positif menuju katoda. Selama gerakannya menuju anoda elektron menumbuk gas Argon lainnya, sehingga terjadi ionisasi sekunder yang menghasilkan pasangan elektron-ion baru. Proses tersebut akan berkelanjutan hingga terkumpul muatan yang besar pada anoda sehingga tegangan anoda akan turun dan menghasilkan pulsa listrik.

Argon positif akan bergerak menuju katoda dan bertumbu-

kan dengan molekul Bromine. Karena potensial ionisasi Argon lebih tinggi dari molekul Bromine, maka Argon akan dapat menarik elektron dari molekul Bromine dan menjadi netral. Selanjutnya molekul Bromine akan menjadi positif dan akan ditralkan pada katoda dengan menarik elektron katoda. Sisa tumbukan antara Argon dengan Bromine dan Bromine positif dengan katoda dipancarkan dalam bentuk foton-foton yang tak diinginkan. Foton-foton ini jika tidak diserap akan mengakibatkan lucutan di sepanjang anoda. Penyerapan foton - foton tersebut dilakukan oleh gas Bromine yang dipergunakan untuk berdisosiasi membentuk dua atom Bromine. Sedangkan tenaga Neon sewaktu dieksitasi digunakan untuk mengionisasi gas Argon. Hal ini akan menambah jumlah pasangan elektron-ion semakin besar yang mengakibatkan tegangan operasi detektor Geiger Muller menjadi rendah.⁽⁴⁾

II.3.4. Bentuk Pulsa Detektor Geiger Muller

Bentuk pulsa keluaran detektor Geiger Muller ditunjukkan dalam gambar 2.6.⁽⁵⁾ ini.



Gambar 2.6. Bentuk pulsa keluaran detektor GM

keterangan :

τ_d = waktu mati

τ_r = waktu pulih

τ_s = waktu resolusi

Waktu mati (*dead time*) adalah waktu dimana detektor tidak mampu untuk mencacah partikel radiasi yang masuk ke dalam tabung detektor.

Waktu pulih (*recovery time*) adalah selang waktu antara akhir waktu mati sampai timbul bentuk pulsa yang normal.

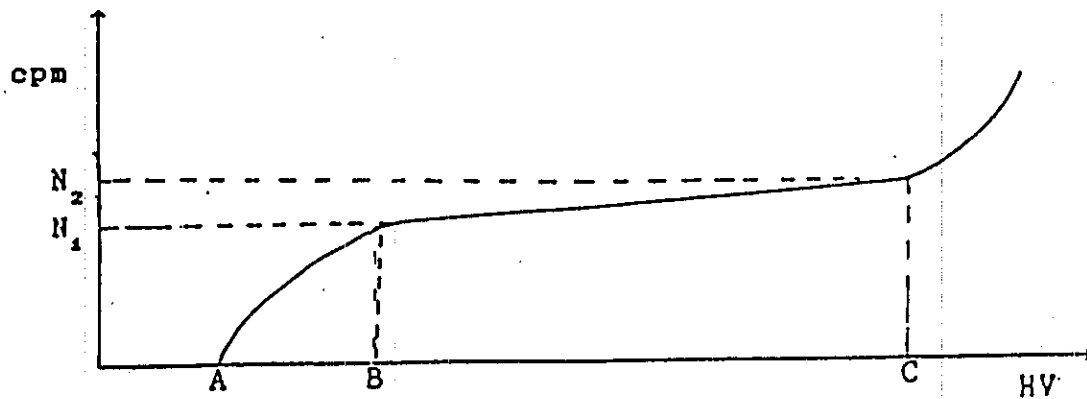
Penjumlahan antara waktu mati dan waktu pulih dinamakan waktu resolusi (*resolving time*). Waktu resolusi merupakan selang waktu yang dibutuhkan detektor untuk mencacah dua partikel berurutan.

II.3.5. Karakteristik Detektor Geiger Muller

Karakteristik detektor Geiger Muller meliputi daerah tegangan operasi, slope, efisiensi dan umur detektor.

II.3.5.1. Daerah Tegangan Operasi Detektor Geiger Muller

Daerah tegangan operasi detektor Geiger Muller disebut plato (*plateau*). Panjang plato detektor mulai dari tegangan ambang (*threshold voltage*) sampai tegangan yang menimbulkan lucutan kontinyu dalam tabung detektor. Berikut ini gambar kurva kenaikan tegangan sebagai fungsi kecepatan pencacahan :



Gambar 2.7. Kurva kenaikan tegangan sebagai fungsi kecepatan pencacahan

keterangan :

A = tegangan awal

B = tegangan ambang

C = batas tegangan terjadinya lucutan kontinyu

N_1 = kecepatan pencacahan pada tegangan V_1

N_2 = kecepatan pencacahan pada tegangan V_2

Kemiringan kurva plato detektor disebut slope. Besar slope dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :⁽³⁾

$$\text{slope} = \frac{100(N_2 - N_1) / N_1}{(V_2 - V_1)} \times 100\% \quad (2.8)$$

dimana V_2 = tegangan akhir plato

V_1 = tegangan awal plato

Detektor Geiger Muller dikatakan baik jika memiliki pla-

to yang panjang, tegangan awal rendah, serta slope yang kecil.⁽¹¹⁾

II.3.5.2. Efisiensi Detektor Geiger Muller

Efisiensi detektor adalah perbandingan antara banyaknya pulsa yang dihasilkan detektor dengan banyaknya partikel radiasi masuk yang dipancarkan oleh sumber radiasi. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi besar pencacahan yang dihasilkan detektor. Efisiensi detektor dapat dirumuskan sebagai berikut :⁽¹²⁾

$$\text{Efisiensi} = \frac{N_{\text{sebenarnya}}}{N_s \cdot f_r \cdot f_b \cdot f_v \cdot f_s \cdot f_g} \times 100\% \quad (2.9)$$

dengan

- N_s = disintegrasi sumber radiasi
- f_r = faktor koreksi waktu resolusi
- f_b = faktor koreksi hamburan balik sumber radiasi
- f_v = faktor koreksi jendela detektor
- f_s = faktor serapan diri sumber radiasi
- f_g = faktor geometri detektor

Cacah sebenarnya adalah zarah radiasi yang dapat terdeteksi detektor setelah dikoreksi waktu resolusi (τ), yang didefinisikan sebagai berikut :

$$N_{\text{sebenarnya}} = \frac{N_{\text{tercacah}}}{1 - N_{\text{tercacah}} \cdot \tau} \quad (2.10)$$

Waktu resolusi dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\tau = \frac{N_1 + N_2 - N_{12} - N_b}{N_{12}^2 - N_1^2 - N_2^2} \quad (2.11)$$

dengan

N_1 = jumlah cacah sumber 1

N_2 = jumlah cacah sumber 2

N_{12} = jumlah cacah sumber 1 dan 2

N_b = jumlah cacah latar

Suatu sumber radiasi biasanya diberi pelindung untuk melindungi dari kerusakan. Dengan adanya pelindung tersebut menyebabkan adanya efek hamburan balik. Zarah radiasi yang seharusnya tidak masuk detektor, tetapi karena membentur dinding pelindung zarah tersebut maka akan dipantulkan sehingga masuk dalam medium detektor.

Selain mengalami hamburan balik, zarah radiasi dapat juga tidak masuk medium detektor karena telah diserap oleh sumber radiasi sendiri. Faktor ini dinamakan "serapan diri".

Jarak antara sumber dengan detektor juga sangat mempengaruhi efisiensi detektor. Hal ini disebabkan jarak sumber mempengaruhi jumlah zarah yang masuk dalam medium detektor.

II.3.5.3. Umur detektor

Detektor dikatakan telah mati (rusak) apabila detektor sudah tidak bisa digunakan untuk mendeteksi partikel radiasi. Kejadian ini disebabkan gas pemudur dalam tabung detektor telah habis. Jika memakai gas halogen sebagai gas isianya, maka secara teoritis umur detektor tidak terbatas. Hal ini disebabkan molekul halogen setelah disosiasi akan berrekombinasi. Apabila detektor diisi gas pemudur organik, umur detektor kira-kira 10^9 cacah.⁽⁸⁾

Faktor yang mempengaruhi umur detektor antara lain kebersihan waktu pembuatan, tingkat kevakuman serta jenis dan komposisi gas isian, serta kemurnian bahan.

II.3.6. Sistem Penampil Detektor Geiger Muller

Detektor Geiger Muller agar dapat beroperasi harus dicatu dengan suatu sumber tegangan tinggi searah. Ada beberapa cara untuk dapat memperoleh tegangan tinggi searah, diantaranya adalah :

a. Dengan baterai

Untuk memperoleh tegangan tinggi searah dapat dilakukan dengan menyusun seri baterai. Misalnya, untuk memperoleh tegangan searah 600 volt dapat diperoleh dengan menyusun seri baterai ukuran 1,5 volt sebanyak 400 buah. Ini akan memerlukan tempat yang cukup luas. Cara ini jelas kurang efisien untuk mengoperasikan detektor Geiger Muller.

b. Dengan Transformator

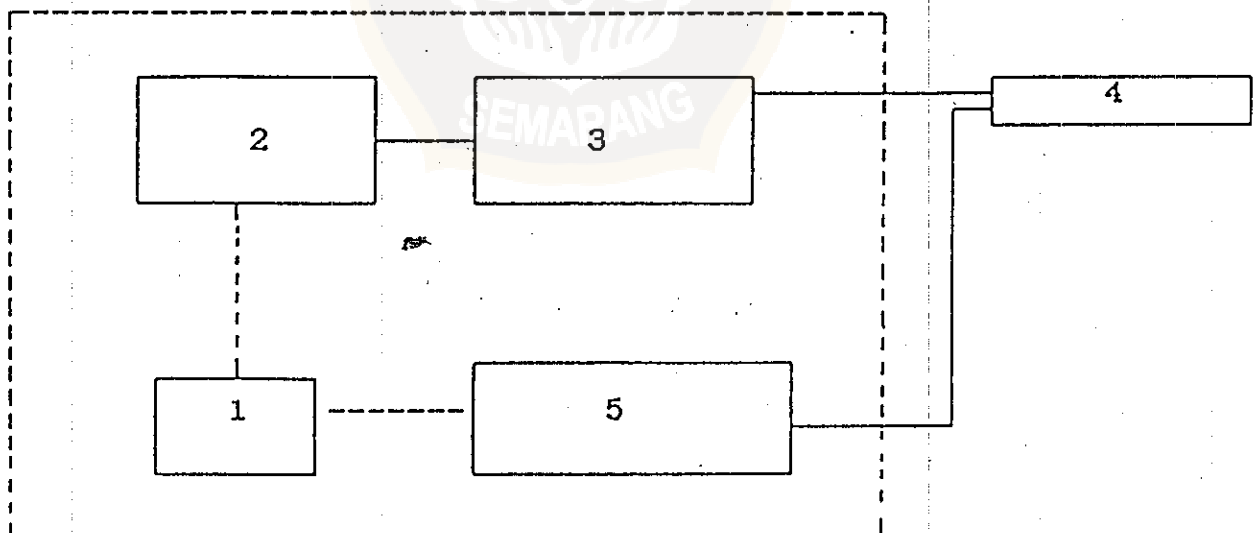
Suatu tegangan bolak-balik dari PLN dapat ditingkatkan dengan

suatu transformator, kemudian disearahkan. Akan tetapi cara ini membutuhkan perbandingan lilitan yang besar, sehingga ukuran transformator menjadi besar dan juga kurang praktis pemakaiannya di lapangan.

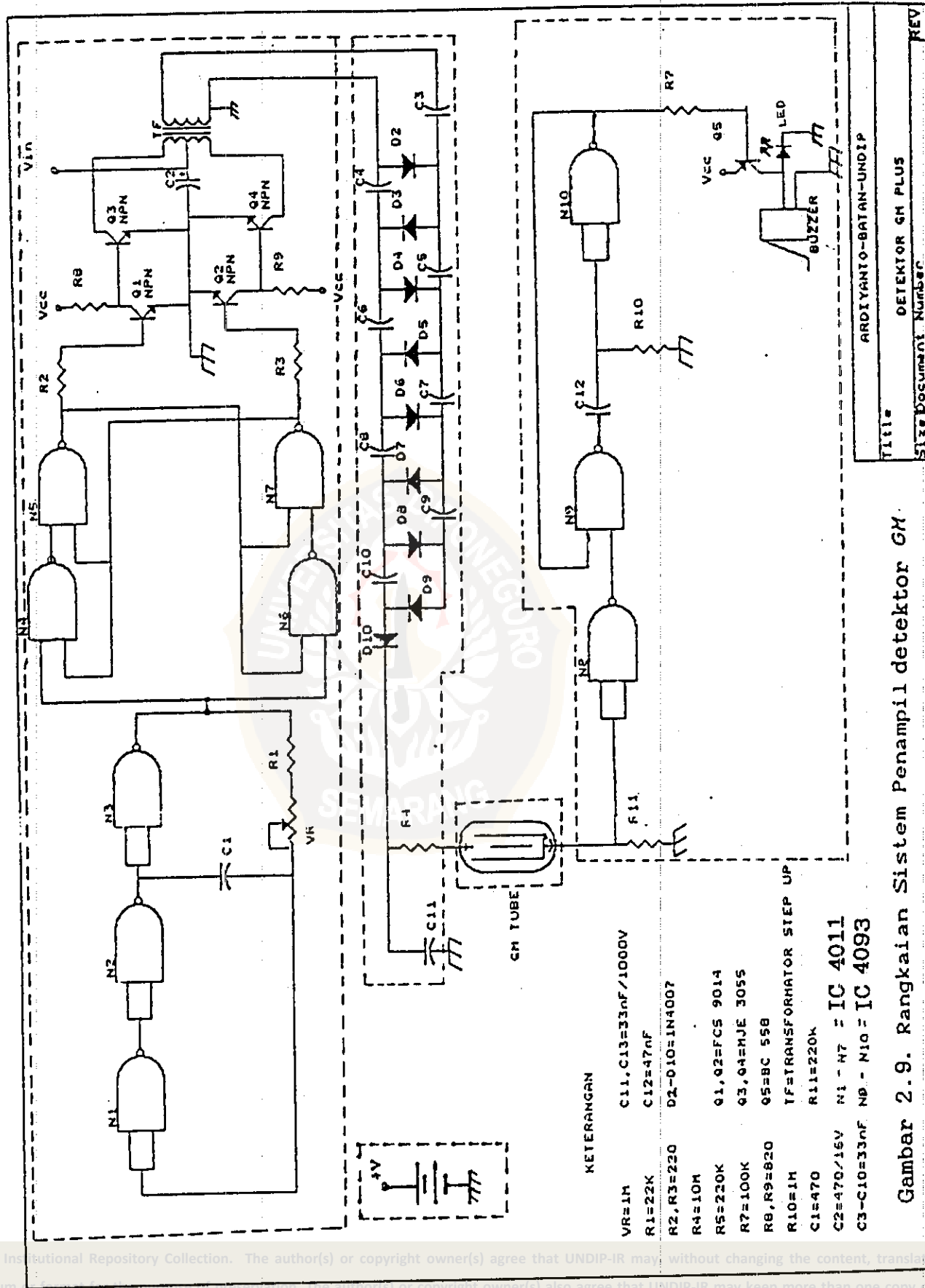
b. Dengan rangkaian kombinasi

Tegangan searah dari baterai diubah menjadi tegangan bolak-balik, kemudian ditingkatkan dengan transformator. Tegangan bolak-balik keluaran dari transformator belum begitu tinggi, kemudian ditingkatkan dan disearahkan dengan pelipat tegangan sehingga diperoleh tegangan tinggi searah. Ini merupakan cara yang cukup efektif untuk memperoleh tegangan tinggi searah yang dapat mengoperasikan detektor Geiger Muller. Cara ini akan diterapkan dalam pembuatan rangkaian penampil detektor di bawah ini.

Sistem penampil detektor Geiger Muller adalah sebagai berikut:



Gambar 2.8. Bagan sistem penampil detektor GM



Gambar 2.9. Rangkaian Sistem Penampil detektor GM

ARDIYANTO-BATAN-UNDIP
DETEKTOR GM PLUS
Document Number
REV

keterangan :

1. Pencatu daya
2. Osilator
3. Rangkaian pelipat tegangan
4. Detektor GM
5. Penampil bunyi dan cahaya

1. Pencatu daya

Sumber daya DC tegangan rendah memakai baterai.

2. Osilator

Gelombang persegi dihasilkan oleh C_1 , R_1 , VR dan gerbang N_1 , N_2 , N_3 . Gelombang ini merupakan masukan bagi rangkaian flip-flop yang tersusun dari gerbang N_4 , N_5 , N_6 dan N_7 . Keluaran dari flip-flop ini berlawanan kondisi logikanya. Transistor Q_1 , Q_2 , Q_3 , dan Q_4 sebagai sumber arus bagi trafo penaik tegangan. Keluarannya berupa tegangan bolak-balik.

4. Pelipat Tegangan

Rangkaian pelipat tegangan terdiri dari beberapa tingkat. Setiap tingkat terdiri dari dua kapasitor dan dua dioda. Prinsip kerja dari rangkaian ini adalah pengisian muatan kapasitor dan penyearahan oleh dioda. Keluaran dari rangkaian ini berupa tegangan tinggi searah. Besarnya tegangan keluaran juga dipengaruhi oleh adanya rugi tegangan dan tegangan riak.

$$V_{maks} = 2nE - \Delta V \quad (2.12)$$

$$V_{min} = 2nE - \Delta V - \delta V \quad (2.13)$$

dimana

V = tegangan keluaran

E = tegangan masukan pada pelipat tegangan

n = jumlah tingkat pengganda tegangan

ΔV = rugi tegangan pada pelipat tegangan

δV = tegangan riak

Rugi tegangan dinyatakan dengan :

$$\Delta V = I/fc \{2/3n^3 + 1/2n^2 - 1/6n\} \quad (2.14)$$

Tegangan riak dinyatakan dengan :

$$\delta V = I/fc \{1/2n^2 + 1/2n\} \quad (2.15)$$

f = frekuensi tegangan masukan

c = kapasitansi tiap kapasitor

untuk $n \geq 3$, $(1/2n^2 - 1/6n)$ dapat diabaikan.

Dari persamaan-persamaan di atas ternyata jika fc diperbesar, maka besarnya rugi tegangan dan tegangan riak menjadi lebih kecil.⁽¹⁰⁾

5. Penampil bunyi dan cahaya

Rangkaian ini pada dasarnya merupakan rangkaian diferensiator. Jika ada pulsa dari tabung Geiger Muller masuk, maka akan mengakibatkan transistor Q₅ menghantar, sehingga akan menyebabkan nyala pada LED dan bunyi pada buzzer.

