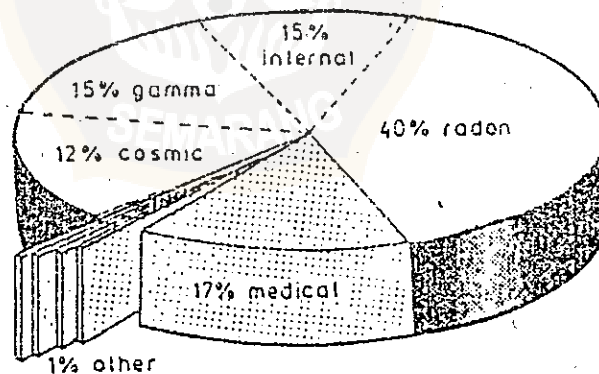


BAB II

TINJAUAN TEORI

2.1. SUMBER RADIASI LINGKUNGAN

Pada dasarnya radionuklida yang mencemari lingkungan ini berasal dari bermacam-macam sumber. Sumber radiasi sendiri menurut asalnya dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu sumber radiasi alam, sumber radiasi buatan manusia dan sumber radiasi akibat kontaminasi lingkungan. Besarnya sumbangan dari bermacam-macam sumber radiasi tersebut ditunjukkan pada gambar (2.1).



Universal Dose Chart .

Gambar 2.1. Kontribusi dosis dari berbagai sumber radiasi

2.1.1. SUMBER RADIASI ALAM

Sumber radiasi alam terdiri dari sumber radiasi kosmis yang berasal dari luar angkasa dan sumber radiasi yang berasal dari bumi yang terjadi secara alami.

a. Radiasi Kosmis

Radiasi kosmis dapat dibedakan menjadi dua, yaitu :

1. Radiasi Primer

Radiasi ini berasal dari angkasa luar, yaitu bintang-bintang dan matahari yang berinteraksi dengan atmosfer. Terdiri dari 79% proton, 20% partikel alpha, dan 0,7% karbon, nitrogen, oksigen dan lainnya.

Sebagian radiasi primer terserap pada lapisan atas 1/10 bagian atmosfer. Kira-kira 20 km dari lapisan atas atmosfer sudah terjadi radiasi kosmis sekunder.

2. Radiasi Sekunder

Radiasi sekunder sebagian berasal dari partikel-partikel yang menuju ke bumi dan berinteraksi dengan medan magnet bumi yang menghasilkan elektron-elektron, sinar gamma, neutron dan meson.

b. Radiasi Dari Bumi

Sumber radiasi dari permukaan bumi ini dapat berasal dari deret Uranium (U-235), deret Thorium (Th-232), K-40, C-14 dan Rb-87. Unsur-unsur ini terbentuk di kulit bumi bersama-sama terbentuknya bumi dan dikenal sebagai *radionuklida primordial*.

Paparan radiasi dari tiap tempat berbeda-beda. Ada beberapa tempat tertentu yang tanah atau batuananya

mengandung kadar Uranium dan Thorium yang tinggi.

Uranium dan Thorium pada umumnya terdapat di batuan fosfat yang digunakan sebagai pupuk. Uranium sendiri terdiri dari U-238 dan U-235. Kedua macam Uranium ini di alam selalu kita dapatkan bersama-sama, dimana perbandingannya adalah U-238 (99,3%) dan U-235 (0,7%).

1. *Radioaktivitas di udara*

Radioaktivitas latar di udara terutama disebabkan oleh gas Radon dan Thoron, yang merupakan hasil peluruhan dari deret U-238 dan Th-232. Kedua gas ini peluruhannya dapat mendatangkan efek yang merusak pada manusia. Apabila terhirup secara berlebihan dapat menyebabkan kanker paru-paru. Kedua gas tersebut terbentuk secara alamiah dan terlarut dalam udara. Pada rumah terutama material bangunannya mengandung gas Radon melebihi kewajaran sampai mencapai 260 Bq/m^3 udara.¹

2. *Radioaktivitas di dalam air*

Di dalam air laut banyak mengandung K-40, sedangkan di dasar laut sendiri mengandung Ra-226 yang konsentrasinya homogen berasal dari sedimen dan pada umumnya konstan. Ra-226 terdapat juga di dalam air

¹ Mukhlis Akhadi, RADON GAS MULIA YANG JAHAT, Aku Tahu,
Nopember 1987

tanah dan sumber air panas. Di sumber air panas konsentrasi Ra-226 lebih kecil dibandingkan dengan konsentrasi Rn-222. Ra-226 sendiri mempunyai sifat seperti Calcium, yaitu terserap oleh tanaman, sampai pada manusia melalui makanan dan akan berada di tulang atau kerangka.

Air hujan juga mengandung zat radioaktif dari udara, sedangkan air tanah biasanya mengandung zat radioaktif yang berasal dari tanah.

2.1.2. SUMBER RADIASI BUATAN MANUSIA

Sumber radiasi buatan manusia telah banyak digunakan, seperti untuk radioisotop, sinar X, akselerator bahan bakar nuklir dan lain-lain. Pemakaian radiasi terdiri dari tiga kategori, yaitu untuk keperluan medis, industri atau eksploitasi sumber alam dan untuk keperluan penelitian.

a. Untuk Keperluan Medis

- Diagnostik

Sinar X dan beberapa keperluan isotop digunakan untuk tujuan pemeriksaan. Penggunaan *fluoroscopy* untuk bermacam-macam keperluan seperti diagnostik patah tulang, pengamatan fungsi kelenjar gondok, pengamatan fungsi organ-organ dengan bubuk Barium, menghitung butir-butir darah merah dan lainnya dengan menggunakan radioisotop I-131, Cr-51, Co-58 dan Fe-59.

- Terapi

Pada pengobatan penyakit tumor atau kanker pada organ

tubuh digunakan sinar X, akselerator, radioisotop Co-58, Cs-137 dan Ra-226.

b. Untuk Industri Dan Eksploitasi Sumber Alam

Kegiatan manusia di dalam memenuhi kebutuhan antara lain dengan pembangunan reaktor untuk pembangkit tenaga listrik dan untuk penelitian, produksi bahan bakar nuklir, pembakaran batubara untuk pembangkit listrik tenaga uap, penambangan batubara dan uranium dengan pembuatan terowongan-terowongan untuk keperluan bahan non-migas dan komoditas industri.

Dari beberapa kegiatan tersebut menyebabkan kontribusi dosis radiasi terbesar ada pada Radon dan Thoron, dikarenakan konsentrasinya yang tinggi dan tersebarnya di udara melalui pernafasan sampai ke paru-paru.

c. Untuk Penelitian

Penggunaan zat radioaktif untuk keperluan penelitian antara lain

- bidang kedokteran : metode teknik perunut untuk organ dan kelenjar
- bidang pertanian : untuk pemilihan bibit unggul
- bidang proses radiasi : sterilisasi alat-alat dan perlengkapan kedokteran; proses iradiasi pengawetan makanan

Disamping itu ada juga penyinaran dari macam-macam sumber, yaitu radiasi yang diterima oleh masyarakat umum selama melakukan kegiatan normal. Sumber radiasi tersebut antara lain pada saat pembuatan jam menggunakan Ra-226

agar bisa berpendar, kaos lampu yang menggunakan Thorium, pesawat sinar X untuk pemeriksaan barang dan pesawat TV berwarna yang menggunakan tegangan 15 - 25 kV memancarkan radiasi sinar X.

2.1.3. SUMBER RADIASI AKIBAT KONTAMINASI LINGKUNGAN

Sumber radiasi yang berasal dari akibat kontaminasi lingkungan antara lain

a. Percobaan Perjata Nuklir

Ledakan senjata nuklir menyebabkan semua energi dilepas dari proses fisi maupun fusi atau kombinasi dari keduanya. Energi yang dilepaskan adalah sangat besar. Sejumlah besar material hasil fisi/fusi yang berupa debu dan gas juga dihamburkan ke atmosfer dan tersebar di lapisan atmosfer seluruh dunia yang biasanya disebut *fall-out* atau *jatuhan*. Lamanya jatuhan tersebut sampai ke permukaan bumi tergantung dari macam jatuhan. Aerosol yang terbentuk karena ledakan disebabkan oleh proses-proses panas yang ditimbulkan oleh materi yang menyebabkan kebakaran dan kondensasi dari penguapan materi. Radioaktivitas yang terdapat dalam partikel aerosol yang besar akan jatuh dalam daerah beberapa ratus kilometer dari titik ledakan yang berupa *jatuhan lokal* dan periodenya antara beberapa menit sampai beberapa bulan. Partikel aerosol yang lebih kecil ukurannya terinjeksi ke dalam troposfir yang lebih rendah dan dapat mengelilingi bumi pada hemisfera (belahan bumi) yang

sama serta akan dijatuhkan ratusan hingga ribuan kilometer dari tempat ledakan. Hal ini disebut *jatuhan troposfir* dan mempunyai periode sampai beberapa bulan. Partikel aerosol yang terbawa ke atas dan masuk ke dalam stratosfir akan mengakibatkan jatuhan di seluruh jagat dan sebagian besar ada di dalam hemisfera tempat terjadinya injeksi. Jatuhan itu dikenal dengan sebutan *jatuhan stratosfir* atau *jatuhan global* dan mempunyai periode sampai beberapa tahun.

Di atmosfer debu radioaktif dapat dipakai sebagai inti kondensasi atau sublimasi oleh elemen-elemen awan. Inti yang bersifat *higroskopis* yang dapat dipakai sebagai pembentukan awan atau hujan. Penghamburan radioaktif yang penting antara lain Sr-90, Cs-137 dan I-131.

b. Kecelakaan Radiasi

Kecelakaan radiasi hampir sama dengan ledakan senjata nuklir. Penyebab dan konsentrasi aktivitas di atmosfer sangat tergantung pada tiga faktor, yaitu :

- faktor kekuatan ledakan
- faktor meteorologi
- faktor garis lintang bumi

Faktor kekuatan ledakan akan menentukan tinggi awan aerosol radioaktif. Oleh karena itu tinggi dari troposfir di daerah kutub lebih rendah daripada di daerah tropis, maka ukuran kekuatan awan yang masuk ke dalam stratosfir bergantung pula pada garis lintang bumi dan kekuatan ledakan. Sedangkan faktor meteorologi akan menentukan

kecepatan dan arah penyebarannya. Tingkat konsentrasi pencemaran juga ditentukan oleh kecepatan angin yang bertiup serta gradien turbulensi udara.

Radiasi yang dilepas ke lingkungan akibat kecelakaan radiasi dapat berupa proses hasil fisi (misalnya I-131, Strontium 90, Cesium 137) dan aktivasi (misalnya Co-60, C-14 dan Krypton 85). radionuklida tersebut dapat berupa gas (partikel udara), cairan, padatan, senyawa organik dan an-organik dengan tingkat radioaktivitas rendah, sedang dan tinggi.

c. *Pembuangan Limbah Radioaktif*

Penyimpanan limbah lestari untuk limbah yang beraktivitas rendah dan sedang dilakukan dengan berbagai cara, misalnya di dalam tanah. Limbah radioaktif ada juga yang disimpan di dalam drum dan dimasukkan ke dalam laut. Beberapa ketentuan yang harus dipenuhi adalah dalamnya laut untuk pembuangan harus lebih dari 2000 meter, jarak dari pantai (lebih dari 50 mil) dari lalu lintas kapal, arus laut bergerak sejajar dengan pantai atau menjauhi pantai dan daerah tersebut tidak dipakai untuk mencari ikan atau hasil laut lainnya⁽⁵⁾. Namun demikian bisa saja terjadi kerusakan pada drum sehingga mengakibatkan bocornya wadah penyimpanan untuk radioaktif.

Di bawah ini diberikan tabel (2.1) mengenai harga dosis ekuivalen efektif tahunan yang diterima manusia yang berasal dari radionuklida kosmogonik.

Sumber	Dosis (μSv) :
H-3	0,01
Ba-7	7
C-14	12
Na-22	0,2

Tabel 2.1⁽³⁾ Dosis ekivalen tahunan dari radionuklida kosmogonik (dalam μSv)
 $1 \mu\text{Sv} = 10^{-4}$ rem

Sedangkan harga pemasukan (intake) tahunan dari radionuklida primordial ditunjukkan pada tabel (2.2).

SUMBER	Pemasukan tahunan (Bq)*	
	Pemalasan	makanan
deret U-238 :		
U-238	0,01	5
Th-230	0,01	2
Ra-226	0,01	15
Rn-222	200 000	300
Pb-210	4	40
deret Th-232 :		
Th-232	0,01	2
Ra-228	0,01	15
Rn-222	100 000	-

* (1 Bq \approx 27 pCi)

Tabel 2.2⁽³⁾ Pemasukan (intake) tahunan dari radionuklida tahunan

Pada tabel (2.3) di bawah ini juga menunjukkan dosis radiasi tahunan yang secara rata-rata diterima oleh manusia. Sebagaimana diketahui bahwa harga dosis tersebut sangat

bervariasi dari tempat ke tempat, yang antara lain bergantung pada kadar zat radioaktif alam yang terdapat di suatu tempat.

SUMBER RADIASI	dosis ekuivalen tahunan (μSv)		
	radiasi eksternal	radiasi internal	total
Radiasi kosmos :			
- Radiasi Pengion	240		240
- Radiasi neutron	42		42
Radionuklida kosmogonik		15	15
Radionuklida primordial			
- K-40	150	180	330
- Rb-87		6	6
Deret U-238 :			
- U-238 \rightarrow U-234	100	5	1239
- Th-230		7	
- Ra-226		7	
- Rn-222 \rightarrow Po-214		1000	
- Pb-210 \rightarrow Po-210		120	
Deret Th-232 :			
- Th-232	160	3	336
- Ra-228 \rightarrow Ra-224		13	
- Rn-220 \rightarrow Tl-208		160	
TOTAL	700	1500	2200

Tabel 2.3. Dosis radiasi tahunan yang diterima manusia rata-rata

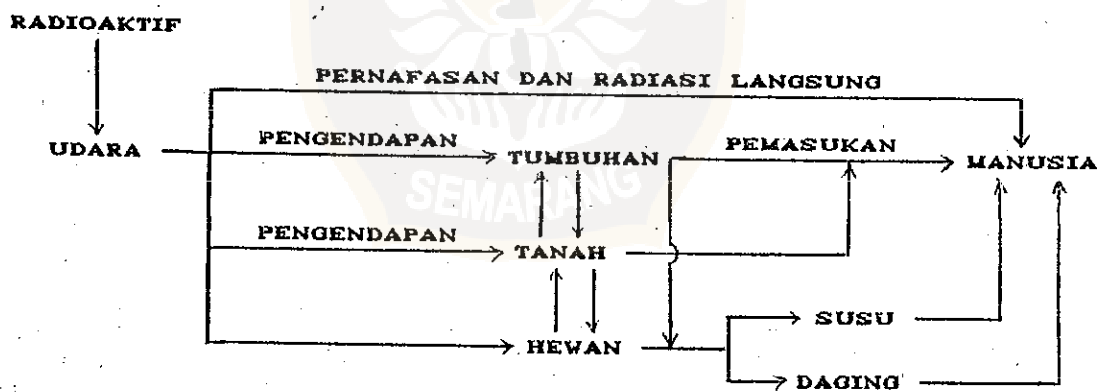
2.2. PEMANTAUAN RADIOAKTIVITAS

Pemantauan terhadap radioaktivitas baik alam maupun buatan manusia sangat penting sekali, mengingat bahwa pencemaran radioaktivitas lingkungan baik yang melalui udara maupun air pada akhirnya akan dapat mencemari manusia.

Di dalam lingkungan terjadi penambahan tingkat radioaktivitas yang akan mengakibatkan penambahan dosis radiasi yang diterima oleh manusia.²

Agar dapat membuktikan bahwa tingkat radioaktif buatan manusia dari waktu ke waktu adalah rendah, terlebih dahulu perlu diketahui tingkat pencemaran. Pemantauan terhadap pencemaran radiasi hanya dilakukan untuk mengevaluasi tingkat radioaktivitas dari sebaran radionuklida dan dosis radiasi yang mungkin diterima.

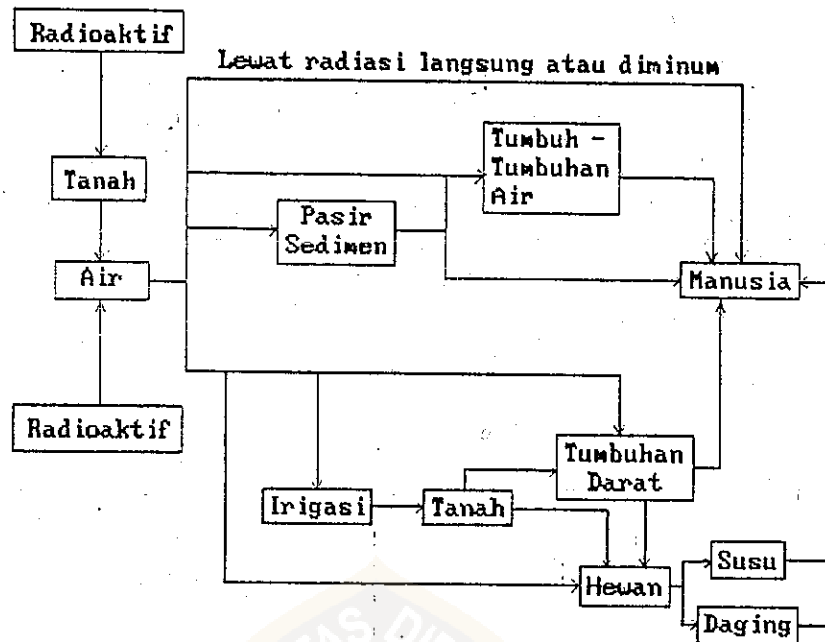
Mengingat bahwa pencemaran radioaktivitas lingkungan baik melalui air, tanah, tumbuh-tumbuhan maupun udara pada akhirnya akan sampai kepada manusia, maka di bawah ini ditunjukkan daur pencemaran radioaktivitas lingkungan baik yang melalui udara maupun melalui tanah dan air.



Gambar 2.2³. Jalur lintasan sumber radioaktif melalui udara

² Rustam Rukmantara, 1980

³ Thayib M. H.; Radionuklida Pencemaran Lingkungan dan Ekologinya



Gambar 2.3⁴ Jalur lintasan sumber radioaktif melalui tanah dan air

Lintasan-lintasan zat radioaktif yang dilepaskan ini menggambarkan bahwa manusialah yang menjadi sasaran terakhir. Oleh sebab itu masalah pengaturan dan pengawasan radioaktivitas lingkungan perlu dilaksanakan dengan baik.

Pemantauan radioaktivitas lingkungan sendiri dapat dilakukan sesuai dengan tempatnya, antara lain :

- tempat di mana zat radioaktif diukur pada titik yang bersangkutan, seperti radiasi eksternal, radioaktivitas di udara, di air dan lain-lain.

⁴ Thayib M. H.; Radionuklida Pencemaran Lingkungan dan Ekologinya

- pengukuran di laboratorium, dengan contoh-contoh yang telah dikumpulkan dari lingkungan seperti air, udara, tanah, tumbuh-tumbuhan dan hewan.

Ada metode yang bisa dilakukan dalam menentukan tingkat radioaktivitas lingkungan. Metode tersebut adalah *metode gross (total)* dan *metode spesifik (khusus)*. Pada metode gross, cuplikan dicacah untuk semua sumber radiasi α , β dan γ tanpa memperhatikan campuran radionuklidanya. Sedangkan untuk metode spesifik, setiap cuplikan ditentukan aktivitas dari masing-masing radionuklidanya. Metode spesifik ini dapat dilakukan oleh spektrometri gamma atau dengan mencacah setelah cuplikan dipisahkan secara radiokimia. Untuk spektrometri gamma telah dengan mudah menentukan secara bersama-sama beberapa radionuklida.

2.3. RADIOAKTIVITAS

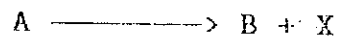
2.3.1. PELURUHAN RADIOAKTIF

Radioaktivitas adalah gejala perubahan keadaan inti atom secara spontan yang disertai dengan radiasi berupa zarah dan atau gelombang elektromagnetik. Perubahan dalam inti atom tentu saja membawa perubahan dari satu nuklida menjadi nuklida yang lain atau dari satu unsur menjadi unsur yang lain. Peristiwa perubahan suatu inti atom menjadi inti atom yang lain disebut sebagai *disintegrasi inti* atau *peluruhan radioaktif*.

Suatu radionuklida dapat mengalami satu atau lebih tahap peluruhan, dengan mengemisikan partikel atau kuantum

foton sampai terbentuk inti yang stabil:

Agar gejala radioaktivitas dapat dinyatakan secara kuantitatif, ditinjau suatu peluruhan sederhana. Pada keadaan sederhana, A meluruh menjadi B yang stabil dengan memancarkan partikel X.



Laju reaksi peluruhan atau perubahan cacah inti atom untuk per satuan waktu sebanding dengan cacah inti atom induk yang ada pada saat itu. Apabila cacah atom induk pada saat t adalah N_t , maka dapat dituliskan bahwa

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t \quad (2.1)$$

dimana λ adalah tetapan radioaktif yang dinyatakan dalam dimensi T^{-1} (per satuan waktu)

Apabila persamaan (2.1) diintegrasikan maka akan didapatkan

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

dimana N_0 adalah cacah inti induk pada saat $t = 0$.

Laju peluruhan suatu radionuklida biasanya dinyatakan secara karakteristik dengan suatu tetapan yang disebut *waktu paro* ($T_{1/2}$). Waktu paro adalah waktu yang diperlukan agar cacah atau radionuklida tersebut menjadi setengah dari cacahnya semula.

$$N_t = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\text{dimana } e^{-\lambda t} = 1/2 \quad \text{atau} \quad -\lambda t = \ln 1/2$$

$$\text{Sehingga } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.3)$$

2.3.2. AKTIVITAS

Cacah atom suatu radionuklida bukanlah besaran yang

dapat diukur langsung. Oleh sebab itu didefinisikan ke dalam suatu besaran yang dapat langsung diukur, yaitu *aktivitas*. Aktivitas suatu radionuklida pada saat t adalah cacah disintegrasi per satuan waktu yang terjadi pada saat t tersebut. Aktivitas pada saat t biasanya dinyatakan dengan A_t dan tidak lain adalah laju peluruhan radioaktif dN_t/dt . Sehingga persamaan (2.1) dapat ditulis sebagai

$$A_t = - \lambda N_t \quad (2.4)$$

Dengan cara yang sama untuk menurunkan persamaan (2.2) didapatkan

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

Secara internasional telah disepakati suatu satuan aktivitas yang disebut *becquerel*, disingkat Bq. Satu becquerel didefinisikan sebagai satu disintegrasi inti per sekon (*dps*).

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

Disamping satuan becquerel, masih juga dipergunakan satuan lama yang disebut satuan *curie*, disingkat Ci.

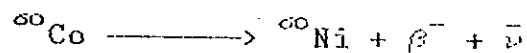
$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

2.3.3. PELURUHAN . MMA

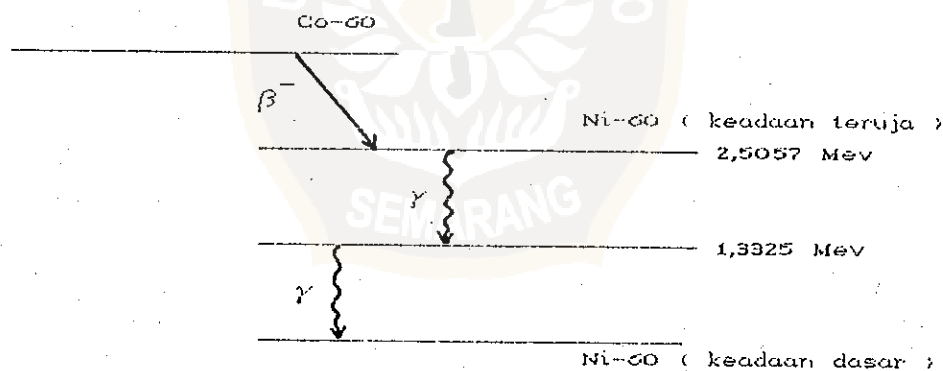
Sebuah inti dapat berada dalam keadaan ikat yang energinya lebih tinggi daripada keadaan dasar, seperti juga atom bisa berada dalam keadaan seperti itu. Setelah inti memancarkan zarah β^+ atau β^- atau α atau mungkin juga tangkapan elektron, maka inti atom tersebut akan berada dalam keadaan teruja (*excited state*). Inti yang teruja ini

segera akan menuju ke keadaan dasar dengan jalan memancarkan radiasi elektromagnetik yang disebut sebagai sinar- γ .

Sinar gamma seperti radiasi elektromagnetik lainnya yang bisa dipandang sebagai paket-paket satu tenaga yang disebut foton gamma. Massa atau muatan suatu inti yang memancarkan sinar gamma tidak berubah. Sebagai contoh suatu peluruhan gamma ditinjau Co-60 yang meluruh menjadi Ni-60 melalui peluruhan β^- .



Ni-60 yang terbentuk berada dalam keadaan teruja (2,5057 Mev di atas keadaan dasarnya) dan segera meluruh dengan memancarkan dua sinar gamma masing-masing dengan energi 1,1732 Mev dan 1,3325 Mev. Skema peluruhan Co-60 dapat dilihat pada gambar (2.2).



Gambar 2.4. Skema peluruhan Co-60

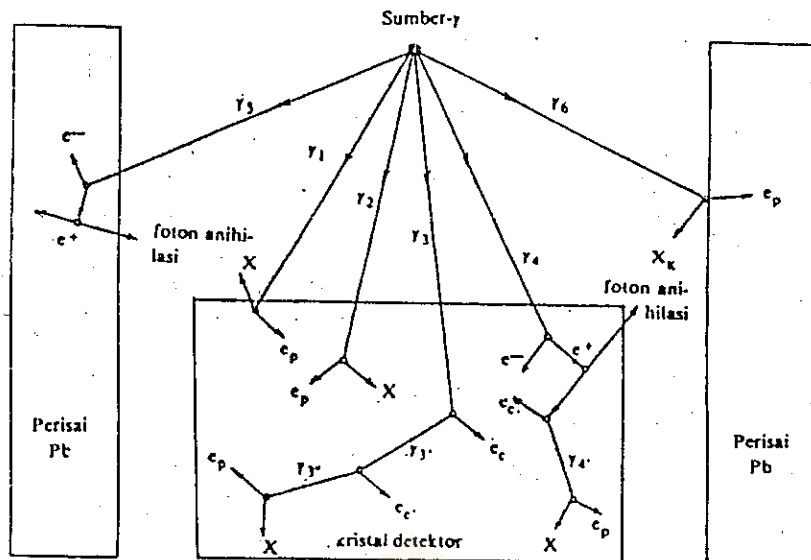
Sinar gamma yang dipancarkan oleh inti atom dapat berinteraksi dengan elektron-elektron pada orbital atom itu sendiri. Biasanya interaksi semacam ini terjadi pada kulit K, L atau M. Sinar gamma akan menyerahkan tenaganya kepada

elektron, dan elektron akan dipancarkan keluar dari sistem atom dengan tenaga gerak sebesar tenaga sinar gamma dikurangi tenaga ikat elektron. Peristiwa ini dinamakan *konversi internal* dan elektron yang dipancarkan keluar dinamakan *elektron konversi*.

Dalam suatu peluruhan, sinar gamma yang dihasilkan tidak seluruhnya mengalami konversi internal, sebagian yang lain akan dipancarkan keluar dari sistem atom dan akan berinteraksi dengan materi di sekitarnya.

2.4. INTERAKSI SINAR GAMMA DENGAN MATERI

Radiasi gamma adalah bentuk gelombang elektromagnetik yang dipancarkan sebagai kuantum atau foton. Spektrum sinar gamma terbentuk sebagai hasil interaksi antara sinar gamma dengan materi, yang dalam hal ini adalah detektor. Interaksi sinar gamma dari suatu cuplikan dengan materi bisa terjadi melalui beberapa proses, yaitu *Efek Fotolistrik*, *Hamburan Compton* dan *Produksi Pasangan*.

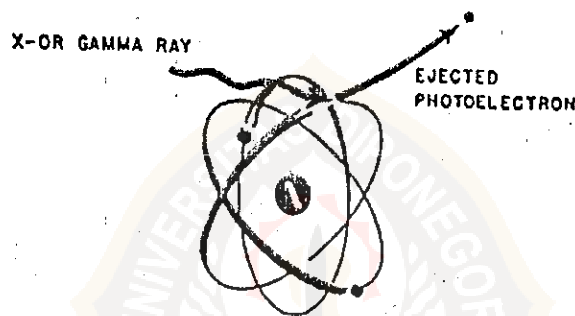


Gambar 2.5. Interaksi sinar gamma dengan detektor dan perisai

2.4.1. EFEK FOTOLISTRIK

Sinar gamma yang mengalami efek fotolistrik dalam interaksinya dengan detektor akan menyerahkan seluruh tenaganya pada elektron kulit K dari materi detektor. Tenaga ikat elektron K pada Germanium besarnya adalah 10 keV, sedangkan pada Iodium adalah 28 keV. Apabila tenaga sinar gamma yang mengalami efek fotolistrik adalah E_0 keV, maka foto-elektron yang dibebaskan akan mempunyai tenaga sebesar $(E_0 - 10)$ keV pada detektor Ge dan $(E_0 - 28)$ keV pada detektor NaI(Tl). Segera setelah foto-elektron dibebaskan ke luar oleh sistem atom maka sebagai akibat pengaturan kembali konfigurasi elektron akan dipancarkan sinar X dan atau

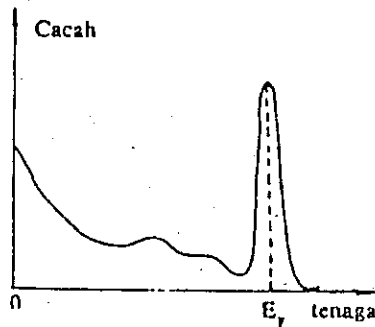
elektron *Auger*. Hampir semua sinar X ini akan diserap oleh bahan detektor dan tenaganya diserahkan pada foto-elektron yang dilepaskan. Dengan demikian seluruh tenaga sinar gamma yaitu sebesar E_0 keV diserap oleh detektor dan diubah menjadi pulsa-pulsa yang tingginya sebanding dengan E_0 . Hal ini ditunjukkan dengan munculnya puncak berbentuk fungsi *Gauss* pada nomor kanal yang bersesuaian dengan tenaga E_0 keV. Puncak semacam ini dinamakan sebagai *puncak fotolistrik* atau *photopeak*.



Gambar 2.6. Efek Fotolistrik

Untuk tenaga sinar X yang cukup besar, foton-fotonya mempunyai kemampuan menembus kristal detektor lebih dalam sebelum berinteraksi. Dengan demikian sinar X lebih sukar meloloskan diri dari detektor, maka puncak lolos hanya akan nampak untuk $E_x < 100$ keV. Hal ini disebabkan karena daya pisah detektor yang semakin turun dengan naiknya tenaga sinar gamma. Sehingga pada tenaga yang lebih besar dari 100 keV, kemampuan detektor untuk memisahkan *photopeak* dan puncak lolosnya menjadi sangat berkurang. Dengan kata lain, kebolehjadian terjadinya efek fotolistrik akan naik dengan

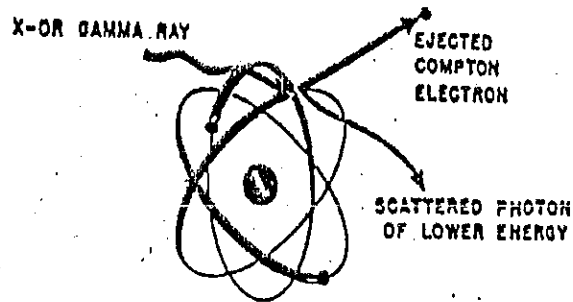
kenaikan nomor atom sasaran dan akan turun oleh kenaikan tenaga sinar gamma. Karena efek fotolistrik hanya dominan pada daerah tenaga rendah, yaitu sekitar 100 keV.



Gambar 2.7. Spektrum dari sinar gamma

2.4.2. HAMBURAN COMPTON

Hamburan Compton terjadi antara sinar gamma dengan seluruh elektron bebas atau yang terikat lemah. Elektron-elektron yang dapat dikategorikan sebagai elektron yang terikat lemah adalah elektron yang berada pada kulit terluar dari suatu atom. Apabila sinar gamma menumbuk elektron jenis ini maka berdasarkan hukum kekekalan momentum, tidak mungkin elektron akan dapat menyerap seluruh tenaga sinar gamma seperti yang terjadi pada efek fotolistrik. Sinar gamma hanya akan menyerahkan sebagian tenaganya kepada elektron dan kemudian terhambur menurut sudut θ terhadap arah gerak sinar gamma mula-mula. Elektron yang terhambur ini biasanya disebut *elektron Compton*.



Gambar 2.8. Hamburan Compton

Tenaga sinar gamma yang terhambur setelah tumbukan merupakan fungsi tenaga gamma mula-mula dan sudut hambur.

$$E_{\gamma} = \frac{E_0}{1 + (E_0/m_0 c^2) (1 - \cos \theta)} \quad (2.6) \quad (31)$$

dimana E_{γ} = tenaga sinar gamma yang terhambur

E_0 = tenaga sinar gamma mula-mula

m_0 = massa diam elektron

c = kecepatan cahaya

θ = sudut hamburan sinar gamma

Berdasarkan hukum kekekalan tenaga, tentu saja tenaga elektron Compton E_e adalah selisih antara tenaga sinar gamma mula-mula dan tenaga sinar gamma terhambur.

$$E_e = E_0 - E_{\gamma} \quad (2.7)$$

Apabila harga E_{γ} disubstitusikan dari persamaan (2.6) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$E_e = E_o \left[\frac{(E_o/m_o c^2) (1 + \cos \theta)}{1 + (E_o/m_o c^2) (1 + \cos \theta)} \right] \quad (2.8)$$

Sinar gamma akan kehilangan tenaga maksimum (elektron compton akan menerima tenaga maksimum) apabila terjadi tumbukan frontal dengan $\theta=180^\circ$ terhadap elektron. Pada saat demikian tenaga elektron compton adalah

$$E_e (\text{max}) = \frac{E_o}{1 + m_o c^2 / 2E_o} \quad (2.9)$$

Apabila sudut antara elektron compton dengan arah sinar gamma mula-mula dinyatakan dalam θ , maka sudut tersebut dapat dinyatakan sebagai

$$\tan \theta = \frac{1}{1 + (E_o/m_o c^2) \tan (\theta/2)} \quad (2.10)$$

Dari persamaan ini nampak bahwa karena θ berkisar antara 0° sampai 180° , maka θ hanya berkisar antara 0° sampai 90° . Hal ini berarti bahwa elektron compton selalu terhambur ke depan dan tidak pernah ke belakang.

Untuk tenaga elektron compton dari minimum ($\theta=0^\circ$) sampai maksimum ($\theta=180^\circ$) ada suatu spektrum gamma yang merupakan suatu agihan compton yang terbentang dari tenaga nol sampai suatu tenaga maksimum. Batas maksimum tersebut sering disebut sebagai *tepi compton* atau *compton edge*.⁽³¹⁾

Pada proses selanjutnya tenaga elektron compton sebesar E_e dengan segera akan diserahkan pada kristal detektor. Jika sinar gamma terhambur itu meloloskan diri, maka akan timbul

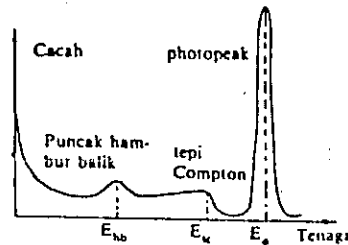
pulsa yang tingginya setara dengan E_e . Jika sinar gamma terhambur tersebut berinteraksi lebih lanjut dengan detektor dan menghasilkan elektron compton dengan tenaga sebesar E_e' dan kemudian mengalami hamburan lagi (yang kemudian meloloskan diri) maka akan timbul pulsa yang tingginya setara dengan $E_e + E_e'$. Proses ini akan berlangsung terus sampai seluruh tenaga sinar gamma (E_0) diserahkan seluruhnya pada detektor. Interaksi yang berturutan ini terjadi sedemikian cepat sehingga efeknya sama dengan interaksi satu langkah. Sebagai hasilnya muncul pulsa yang tingginya setara dengan E_0 , yaitu sama dengan pulsa yang dihasilkan oleh efek fotolistrik. Dengan kata lain, hamburan compton memberikan sumbangan pada intensitas photopeak.

Kecuali berinteraksi dengan detektor, sinar gamma yang dideteksi juga berinteraksi dengan materi di sekitarnya. Yang paling sering adalah dengan bahan perisai detektor. Foton terhambur yang dihasilkan oleh interaksi sinar gamma dengan perisai dapat masuk ke dalam detektor dan dideteksi. Tentu saja hal ini hanya terjadi untuk sudut hamburan θ yang besar. Untuk hamburan dengan $\theta=180^\circ$ dihasilkan sebuah puncak kecil yang duduk di atas agihan compton. Puncak semacam ini disebut *puncak hamburan balik* atau *backscatter peak*.⁽³¹⁾

Tenaga puncak hambur balik dapat dihitung dengan memasukkan harga $\theta=180^\circ$ ke dalam persamaan (2.6), sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut

$$E(\text{hambur balik}) = \frac{1}{1 + 2 \left(\frac{E}{m_0 c^2} \right)} \quad (2.11)$$

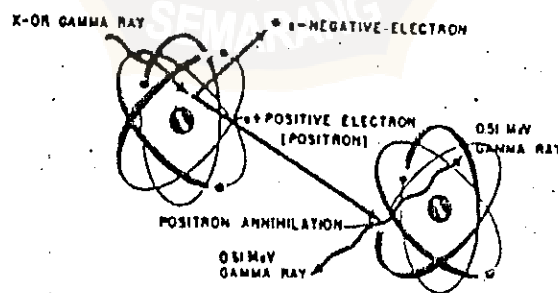
Di bawah ini ditunjukkan suatu spektrum gamma yang berasal dari hamburan Compton.



Gambar 2.9. Spektrum γ dari hamburan Compton

2.4.3. PRODUKSI PASANGAN

Apabila suatu sinar gamma yang bertenaga cukup tinggi melalui medan listrik yang sangat kuat di sekitar inti atom (medan Coulomb inti), maka sinar gamma tersebut akan lenyap dan sebagai gantinya muncul pasangan elektron (e^-) dan positron (e^+). Peristiwa ini disebut *efek produksi pasangan*.



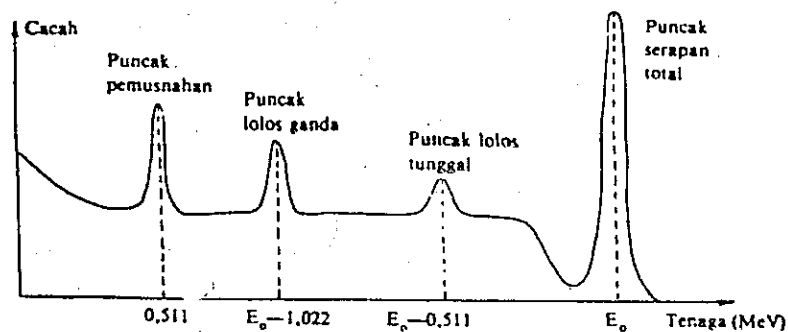
Gambar 2.10. Peristiwa Produksi Pasangan

Tenaga sinar gamma mula-mula dibagi di antara kedua arah tersebut. Elektron akan segera menyerahkan tenaganya

kepada kristal detektor, sedangkan positron bergabung dengan elektron lain dan mengalami pemusnahan. Sebagai gantinya dipancarkan dua foton yang bertolak belakang. Kedua foton ini dapat berinteraksi lebih lanjut dengan detektor melalui proses fotolistrik maupun hamburan Compton. Bisa juga terjadi salah satu atau bahkan kedua foton anihilasi itu meloloskan diri ke luar dari kristal detektor.

Jika hanya satu foton yang berhasil meloloskan diri, maka akan timbul pulsa yang akan mengakibatkan puncak pada spektrum gamma. Puncak yang demikian disebut *puncak lolos tunggal* atau *single escape peak*. Jika kedua foton anihilasi itu dapat meloloskan diri, maka akan timbul *puncak lolos ganda* atau *double escape peak*. Jika foton anihilasi tidak ada yang meloloskan diri, maka hal itu berarti seluruh tenaga foton gamma diserahkan kepada detektor. Sehingga puncak yang dihasilkan adalah puncak serapan total.

Jika terjadi interaksi pembentukan pasangan antara foton gamma dengan dinding perisai, maka akan timbul puncak lagi yang disebut *puncak anihilasi* atau *puncak pemusnahan*.



Gambar 2.11. Spektrum γ oleh Produksi Pasangan

2.4.4. SIFAT ATENUASI MATERI

Suatu berkas sinar gamma yang berinteraksi dengan materi melalui tiga proses seperti yang telah diuraikan di muka, akan mengalami penurunan intensitas atau *ter-atenuasi*.

Besaran yang dipakai untuk menyatakan besarnya atenuasi yang dialami oleh seberkas sinar gamma adalah *koefisien atenuasi* (μ).

Koefisien atenuasi ini merupakan jumlah dari ketiga koefisien atenuasi parsial.

$$\mu \text{ (total)} = \mu_{fl} + \mu_{hc} + \mu_{pp} \quad (2.12)$$

dimana $\mu \text{ (total)}$ = koefisien atenuasi total

μ_{fl} = koefisien atenuasi fotolistrik

μ_{hc} = koefisien atenuasi hamburan compton

μ_{pp} = koefisien atenuasi produksi pasangan

Apabila cacah foton mula-mula N , maka setelah melalui materi setebal dx , cacah foton akan berkurang sebesar

$$\frac{dN}{N} = - \mu dx \quad (2.13)$$

Jika diintegrasikan maka akan didapat persamaan

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (2.14)$$