

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

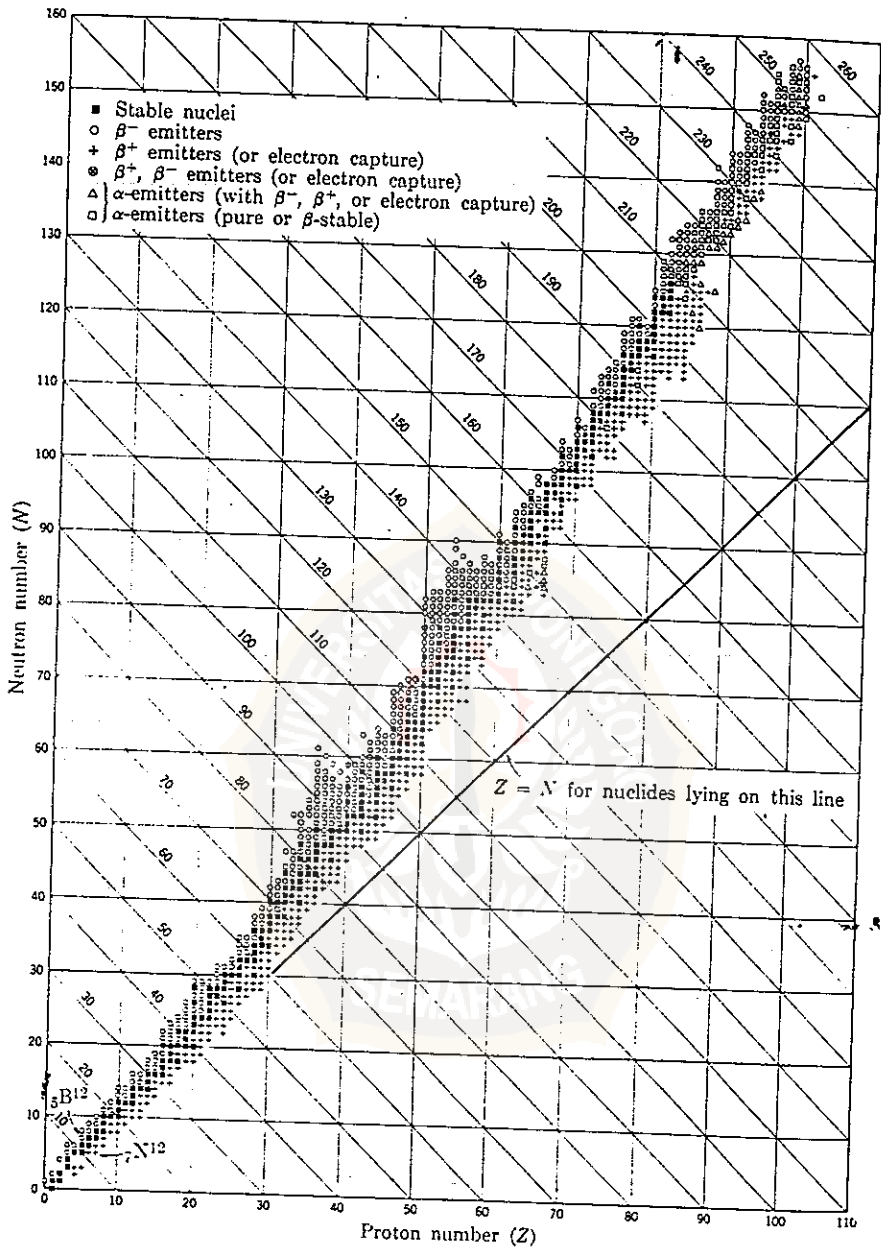
2.1. Atom dan Inti Atom

Atom menurut Niels Bohr digambarkan sebagai bola yang terdiri dari inti (nukleon) dan dikelilingi oleh kulit-kulit yang berisi elektron. Inti tersusun atas proton (Z) dan neutron (N). Masa atom (A) merupakan jumlah massa proton dan neutron dalam inti.

$$A = Z + N \dots\dots\dots(2.1)$$

Dalam inti terjadi gaya Coulomb tolak menolak antara proton dengan proton. Untuk menjaga kestabilan inti diperlukan gaya tarik menarik yang disebut dengan gaya inti. Inti akan stabil bila jumlah proton dan neutron sama atau $N/Z = 1$.

Pada gambar di bawah terlihat isotop-isotop stabil terletak pada daerah yang sempit. Inti atom yang tercetak tebal merupakan inti yang stabil. Kemiringan daerah yang semula bernilai satu secara bertahap meningkat sejalan dengan naiknya jumlah nomor atom. Perbandingan neutron terhadap proton naik secara bertahap. Sebagian besar inti radioaktif berada di luar daerah stabilitas inti.



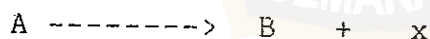
ab. 2.1. Grafik stabilitas inti
 (Irving Kaplan, 1963)

2.2. Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah gejala perubahan keadaan inti atom secara spontan yang disertai radiasi berupa zarah atau gelombang elektromagnetik (Wisnu Susetyo, 1988). Perubahan dalam inti atom membawa perubahan dari satu nuklida menjadi nuklida yang lain. Perubahan inti atom menjadi inti atom yang lain dikenal dengan desintegrasi inti atau peluruhan radioaktif.

Suatu radionuklida dapat mengalami satu atau lebih tahap peluruhan sampai terbentuk inti yang stabil. Momen desintegrasi suatu atom tidak dipengaruhi oleh kondisi kimia dan fisika nuklida. Dalam hal ini ada beberapa pengecualian bila elektron orbital ikut berpartisipasi pada proses desintegrasi. Misalnya pada peristiwa tangkapan elektron.

Agar gejala radioaktivitas dapat dinyatakan secara kuantitatif, ditinjau suatu peluruhan radioaktif berikut :



Banyaknya atom yang meluruh per satuan waktu adalah :

$$- dN/dt = \lambda N \quad (2.2)$$

λ adalah konstanta peluruhan, merupakan hasil bagi kemungkinan transformasi radioaktif dW dalam waktu dt .

$$\lambda = \frac{dW}{dt} \quad (2.3)$$

Bila jumlah atom N pada waktu t meluruh maka persamaan (2.2) menjadi :

$$-dN = N dW \quad (2.4)$$

Dan banyaknya transformasi radioaktif dalam waktu dt adalah :

$$\lambda = - \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \quad (2.5)$$

Hasil pengintegralan dari persamaan (2.2) adalah :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

N_0 merupakan jumlah inti nuklida pada saat $t = 0$. Untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan agar jumlah inti mula-mula tinggal setengahnya, waktu paro (T) diambil dari persamaan (2.6) $\frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$ dan diperoleh persamaan :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.7)$$

Bila persamaan (2.7) dimasukkan dalam persamaan (2.6) akan berubah menjadi :

$$N = N_0 e^{-\left(\frac{\ln 2}{T}\right)t} \quad (2.8)$$

2.2.1. Kestimbangan Radioaktif

Banyak dijumpai peluruhan radionuklida berantai dari radionuklida satu menjadi radionuklida dua, kemudian meluruh menjadi radionuklida tiga dan seterusnya. Saat $t = 0$ hanya ada radionuklida satu sebanyak N_0 , pada saat $t = t$ terdapat N_1 dan N_2 .

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t) \quad (2.9)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t) \quad (2.10)$$

Penyelesaian dari persamaan (2.9) adalah :

$$N_1(t) = N_1(0) e^{-\lambda_1 t} \quad (2.11)$$

Apabila harga $N_1(t)$ dimasukkan ke dalam persamaan (2.10) didapatkan nilai $N_2(t)$ sebesar :

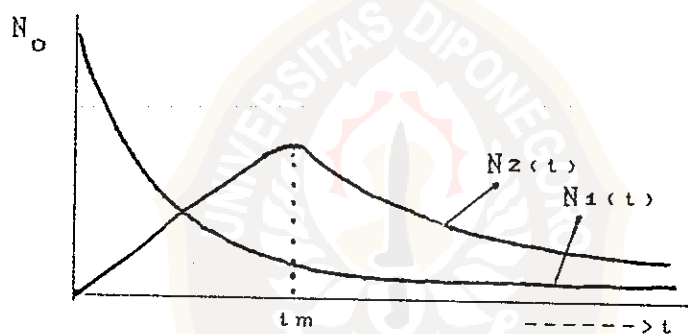
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) e^{-\lambda_1 t} + C e^{-\lambda_2 t} \quad (2.12a)$$

Untuk mendapatkan nilai konstanta C dimasukkan harga $N_2(t) = N_2(0) = 0$, sehingga diperoleh nilai akhir $N_2(t)$:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.12b)$$

2.2.1.1. Keseimbangan Ideal

Keseimbangan ideal merupakan keadaan yang menunjukkan besarnya aktivitas radionuklida induk sama dengan anak luruhnya. Apabila ditinjau aktivitas anak luruh sebesar N_2 maksimum pada waktu $t=t_m$ akan berlaku $\frac{dN_2}{dt} = 0$. Dengan memasukkannya ke dalam persamaan (2.10) akan diperoleh persamaan $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$. Hal ini menunjukkan kesamaan jumlah inti induk dan anak luruh radionuklida. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada kurva keseimbangan ideal berikut ini.



Gb. 2.2. Kurva keseimbangan ideal

Besarnya t_m diperoleh dengan menurunkan persamaan (2.12b) sehingga diperoleh :

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \dots \dots \dots (2.13)$$

2.2.1.2. Keseimbangan Sekular

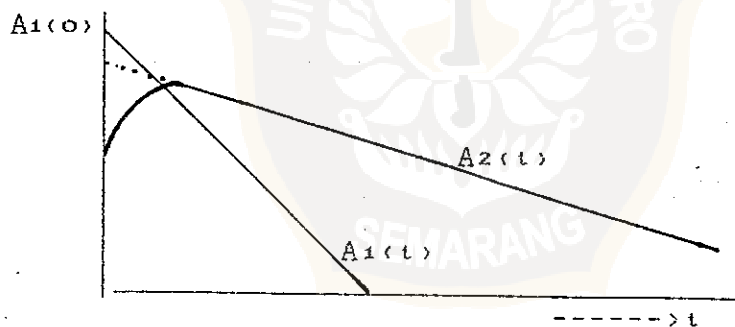
Dalam bentuk aktivitas, jumlah inti radionuklida pada persamaan (2.11) dan (2.12b) dapat dinyatakan sebagai :

$$A_1(t) = A_1(0) e^{-\lambda_1 t} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$A_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1(0) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \dots (2.15)$$

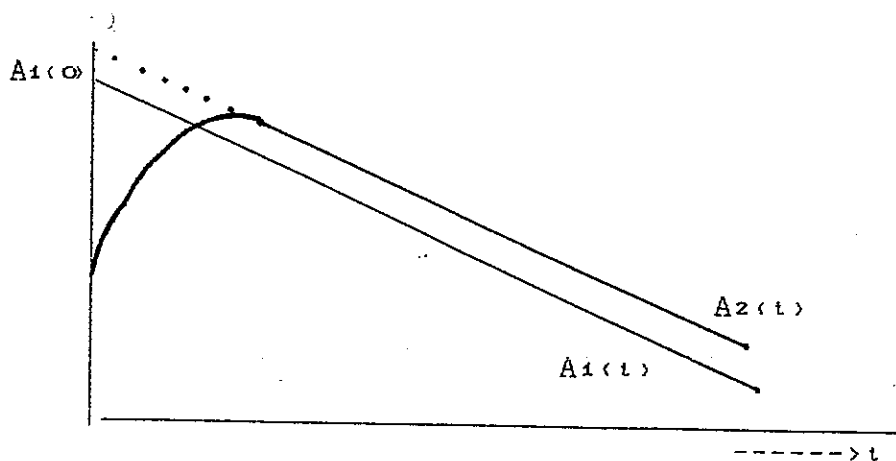
Dari kedua persamaan tersebut dijumpai 3 macam kasus yang berbeda. Kasus-kasus tersebut masing-masing sebagai berikut :

1. Bila waktu paro induk jauh lebih kecil dari waktu paro anak luruhnya ($T_1 \ll T_2$), maka tidak akan terjadi kesetimbangan antara keduanya. Pada kasus ini $A_1(t)$ akan habis dengan cepat. Nilai $e^{-\lambda_1 t}$ mendekati nol, dalam jangka waktu $7T_1$ aktivitas induk tinggal $\frac{1}{128}$ aktivitas mula-mula. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada kurva di bawah ini.



gb. 2.3. Aktivitas induk dan anak luruhnya bila $T_1 \ll T_2$

2. Jika waktu paro induk lebih besar dari anak luruhnya ($T_1 > T_2$) akan terbentuk kesetimbangan transien. Perbandingan aktivitas induk dan anak luruhnya konstan dalam jangka waktu tertentu seperti terlihat pada kurva di bawah ini.

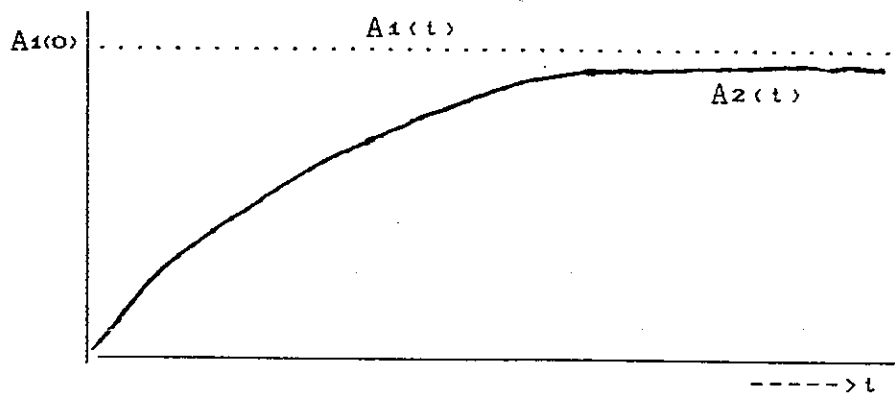


Gb. 2.4. Aktivitas induk dan anak luruhnya dengan $T_1 > T_2$

Dalam jangka waktu yang cukup panjang yaitu $7T_1$, nilai $e^{-\lambda_2 t}$ dapat diabaikan terhadap $e^{-\lambda_1 t}$. Aktivitas anak luruhnya berubah menjadi :

$$A_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1(t) \dots \dots \dots (2.16)$$

3. Kasus ketiga terjadi apabila waktu paro induk radionuklida jauh lebih besar dari waktu paruh anak luruhnya ($T_1 \gg T_2$). Perbandingan aktivitas induk dan anak luruhnya mendekati satu sehingga dianggap sama ; $A_2(t) = A_1(t)$. Dengan mengetahui aktivitas anak luruh berarti juga mengetahui aktivitas induknya. Kesetimbangan ini dikenal sebagai kesetimbangan sekular. Contoh yang paling kongkrit adalah pada kesetimbangan antara Sr-90 sebagai induk radionuklida dan Y-90 sebagai anak luruhnya. Kurva berikut ini akan lebih menjelaskan kesetimbangan tersebut.



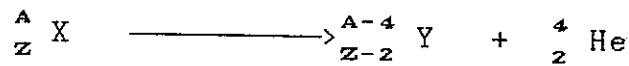
Gb. 2.5. Kesetimbangan sekular

2.2.2. Peluruhan Radioaktif

Peluruhan radioaktif akan disertai radiasi berupa zarah atau gelombang elektromagnet. Dalam hal ini zarah yang dihasilkan adalah partikel alfa dan beta, gelombang elektromagnet yang dipancarkan merupakan sinar gama. Partikel alfa mempunyai massa dan bermuatan dua positif sedangkan partikel beta bermuatan negatif, massanya dianggap nol karena terlalu kecil. Sinar gama tidak mempunyai massa dan muatan. Karenanya sinar gama lebih ditekankan pada sifatnya sebagai gelombang. Keterangan mengenai ketiga macam radiasi tersebut akan dibahas satu persatu.

2.2.2.1. Peluruhan Alfa

Sebuah inti tidak stabil yang memancarkan sinar α akan kehilangan muatan sebanyak 2 positif masa inti sebanyak 4. Inti akan meluruh menjadi sebuah inti lebih ringan dan partikel α atau inti helium.



Peluruhan α akan membebaskan energi karena inti hasil peluruhan terikat lebih erat dari pada inti semula. Besarnya energi tergantung dari masa seluruh inti yang terlibat dalam peluruhan ini dan merupakan energi kinetik. (Kenneth S Krane, 1992).

$$Q = [m(X) - m(Y) - m(\alpha)] c^2 \quad (2.17)$$

2.2.2.2. Peluruhan Beta

Peluruhan β merupakan proses perubahan dari sebuah proton menjadi neutron atau sebaliknya. Pada inti peluruhan β mengubah Z dan N dengan satu satuan : $Z \longrightarrow Z \pm 1$, $N = \pm 1$ sehingga $A = Z + N$ selalu tetap.

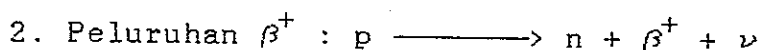
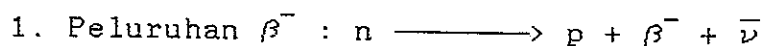
Proses dasar peluruhan β adalah sedemikian :

- a. Peluruhan β^- : $n \longrightarrow p + e^-$
- b. Peluruhan β^+ (positron) : $p \longrightarrow n + e^+$
- c. Tangkapan elektron orbital (ϵ) :

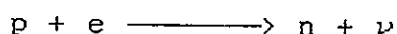
$$p + e^- \longrightarrow n$$

Proses-proses tersebut kurang lengkap, oleh karena itu perlu keterlibatan partikel lain yaitu sebuah neutrino atau anti neutrino. Kedua partikel ini dikemukakan oleh Pauli pada tahun 1931 untuk menjelaskan kehilangan energi dan momentum anguler dalam proses peluruhan β . Proses peluruhan β dapat terjadi jika tersedia energi untuk

pembentukan partikel lepton, sehingga proses di atas berubah menjadi :

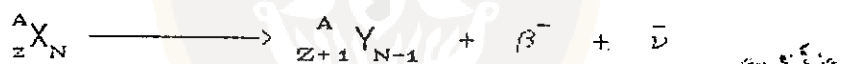


3. Tangkapan elektron orbital (ϵ) :

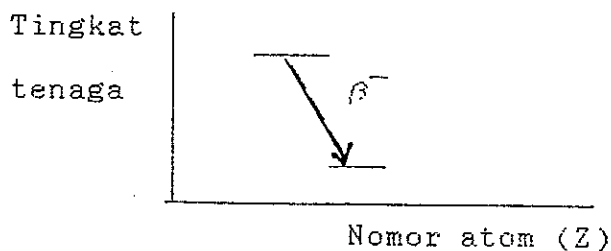


Proses peluruhan β^- secara energetik memungkinkan untuk elektron bebas yang mempunyai $E = 0,78$ Mev dan waktu paro 1 tahun (Enge, 1972). Sedangkan proses peluruhan β^+ dan tangkapan elektron tidak dapat berlangsung tanpa energi tambahan yang dapat menimbulkan medan nukleon lain ke dalam inti.

Berikut ini proses peluruhan β^- dalam sebuah inti :



Proses peluruhan ini digambarkan dalam skema peluruhan dengan anak panah serong ke arah kanan bawah.



Gb. 2.6. Skema peluruhan β^- .

Secara langsung menunjukkan bahwa peluruhan β^-

mengakibatkan berkurangnya tingkat tenaga dan kenaikan nomor atom sebanyak satu satuan.

Seperti pada peluruhan α , ditentukan nilai Q untuk membedakan energi masa inti awal dan akhir (Kenneth S Krane, 1988).

$$Q_{\beta^-} = [m_N ({}^A_Z X) - m_N ({}^A_{Z+1} Y) - m_e] c^2 \quad (2.18)$$

m_N menunjukkan masa inti. Untuk merubah masa inti ke dalam bentuk tabel masa atom netral, digunakan persamaan :

$$m({}^A_Z X)c^2 = m_N ({}^A_Z X)c^2 + Zm_e c^2 - \sum_{i=1}^Z B_i \quad (2.19)$$

B_i merupakan energi ikat elektron ke i . Dalam bentuk masa atom energi peluruhan β^- adalah :

$$Q_{\beta^-} = \{ [m({}^A_Z X) - Zm_e] - [m({}^A_{Z+1} Y) - (Z+1)m_e] - m_e \} c^2 + \{ \sum_{i=1}^Z B_i - \sum_{i=1}^{Z+1} B_i \} \quad (2.20)$$

Dalam kasus ini masa elektron dan energi ikat elektron diabaikan terlebih dahulu, sehingga semua bermasa atom netral.

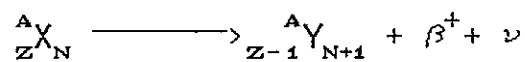
$$Q_{\beta^-} = [m({}^A_Z X) - m({}^A_{Z+1} Y)] c^2 \quad (2.21)$$

Nilai Q mewakili bagian energi elektron dan neutrino (Kenneth S Krane, 1988) :

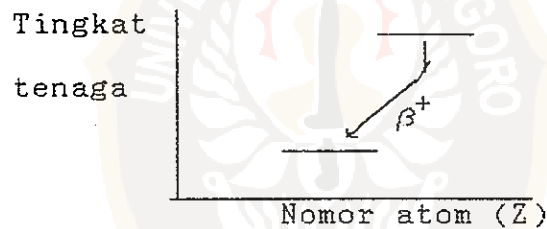
$$Q_{\beta^-} = T_e + E_{\nu} \quad (2.22)$$

Selanjutnya masing-masing berharga maksimum bila yang lain mendekati nol.

Pada peluruhan positron, prosesnya diperlihatkan sebagai berikut :



Dengan skema peluruhan, proses itu digambarkan sebagai anak panah arah bawah yang terpatah dan serong ke arah kiri bawah.



Gb. 2.6. Skema peluruhan β^+

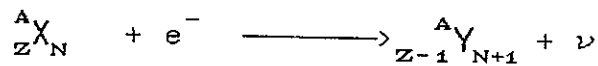
Skema menunjukkan bahwa terjadi pengurangan nomor atom sebanyak satu satuan dan penurunan tingkat tenaga pada anak luruhnya.

Dengan perhitungan yang sama dengan peluruhan β^- , energi peluruhan β^+ diperlihatkan (Kenneth S Krane, 1988) sebagai berikut :

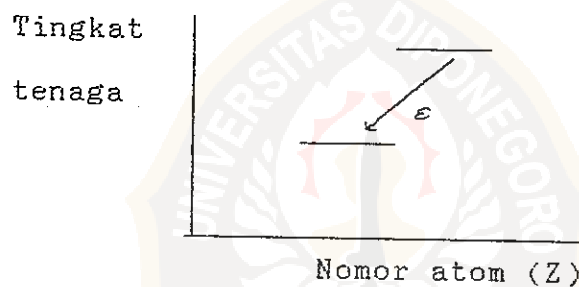
$$Q_{\beta^+} = [m({}^A X) - m({}^A Y) - 2m_e] c^2 \quad (2.23)$$

Persamaan ini sudah menggunakan masa atom netral. Hanya saja untuk peluruhan β^+ masa elektron tidak dapat diabaikan.

Pada peristiwa tangkapan elektron dihasilkan neutrino seperti pada peluruhan positron, prosesnya ditunjukkan :



Gambaran proses ini dijelaskan dengan skema anak panah dengan arah ke kiri bawah.



gb. 2.7. Skema tangkapan elektron

Tampak pada skema, terjadinya penurunan tingkat tenaga dan berkurangnya nomor atom sebanyak satu satuan.

Perhitungan nilai Q harus diambil dalam keadaan Y tereksitasi setelah penangkapan elektron. Hal ini terjadi bila penangkapan terjadi pada kulit bagian dalam, misalnya kulit K , sebuah lowongan elektron terjadi pada kulit selanjutnya yaitu L . Kekosongan segera diisi dari kulit yang lebih tinggi sehingga terjadi keadaan transisi dan memancarkan sinar- x . Energi sinar- x total sama dengan energi ikat elektron yang ditangkap. Masa atom Y lebih

besar dari pada masa atom awal X. Harga Q kemudian diperhitungkan (Kenneth S Krane, 1988) sebagai :

$$Q_e = [m (^A X) - m (^A Y)] c^2 - B_n \quad (2.24)$$

B_n energi ikat tangkapan elektron kulit ke n.

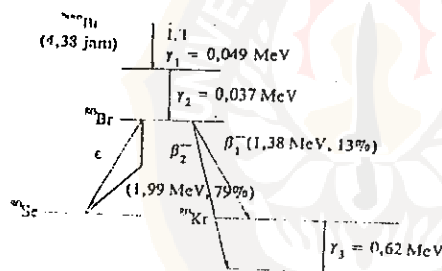
Peluruhan β^+ dan tangkapan elektron (e) merubah inti awal ${}^A_Z X_N$ menjadi inti akhir ${}^A_{Z-1} Y_{N+1}$. Dengan catatan bahwa keduanya mungkin tidak selalu terjadi secara energetik (Q harus positif untuk beberapa peluruhan). Inti peluruhan β^+ secara energetik mungkin mengalami tangkapan elektron, tetapi sebaliknya inti tangkapan elektron tidak mungkin mengalami peluruhan β^+ . Tangkapan elektron mempunyai energi $Q > 0$ bila peluruhan β^+ mempunyai nilai energi $Q < 0$. Perbedaan energi masa atom paling tidak $2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$ untuk membolehkan peluruhan β^+ .

2.2.2.3. Peluruhan Gamma

Peluruhan gamma tidak menimbulkan perubahan masa dan muatan inti atom. Radiasi gamma merupakan tipe radiasi elektromagnet yang mempunyai kecepatan setara dengan kecepatan cahaya (c), tidak mempunyai masa dan juga tidak bermuatan listrik. Radiasi gamma terpancar dari inti atom dalam keadaan teruja (excited state), agar diperoleh keadaan yang stabil. Seperti radiasi elektromagnet lainnya, radiasi gamma dapat dianggap sebagai paket-paket catu tenaga yang disebut foton γ . Transisi gamma

digambarkan sebagai anak panah lurus ke bawah. Yang berarti tidak adanya perubahan nomor atom tetapi terjadi penurunan tingkat energi.

Beberapa energi sinar gamma dapat berasal dari satu inti induk, tergantung pada keragaman sinar α atau sinar β sebelum teruja, seperti yang terlihat pada gambar 2.8. Beberapa radio nuklida dapat memancarkan tiga energi gamma atau lebih secara bersama-sama, untuk mencapai keadaan stabil. Misalnya Ra-226 memancarkan sinar gama dengan energi 609,3 keV, 1120,3 keV dan 1764,5 keV. Bahkan I-131 memancarkan lima energi gama dalam peluruhannya untuk mencapai unsur stabil Xe-131.



Gb. 2.8 Pancaran sinar γ ^{80m}Br (Wisnu Susetyo, 1988)

2.2.3. Interaksi Radiasi dengan Materi

Semua radiasi baik α , β maupun γ akan berinteraksi dengan materi yang dikenai. Apabila radiasi tersebut mengenai elektron orbital akan terjadi ionisasi dan eksitasi. Akan tetapi bila mengenai inti atom, radiasi hanya akan bereaksi dengan neutron.

Radiasi α berinteraksi sangat kuat dengan materi,

sehingga mudah terserap oleh lapisan kertas tipis. Di udara radiasi α hanya terpancar beberapa sentimeter. Bila melewati materi, radiasi α akan kehilangan sejumlah energi karena bereaksi dengan elektron orbital. Pasangan-pasangan ion banyak terbentuk dengan interaksi ini.

2.2.3.1. Interaksi Radiasi Beta

Interaksi radiasi β dengan materi tidak sekuat pada radiasi α , sehingga daya tembusnya lebih besar. Di udara mampu menempuh jarak sejauh 10 meter. Spesifik ionisasinya 4 sampai 8 pasangan ion per milimeter lintasan. Bentuk lintasannya adalah zig-zag. Absorpsi diri radiasi β lebih kecil dibandingkan dengan radiasi α . Akan tetapi absorpsi diri sangat diperhitungkan pada radiasi β lemah.

Untuk mengukur energi β dan elektron konversi dapat digunakan spektrometer magnet. Bila kecepatan β lebih tinggi dari pada kecepatan cahaya (c) akan timbul radiasi biru. Radiasi ini dikenal sebagai radiasi Cerenkov yang dapat diukur menggunakan Cerenkov counter. Bila elektron energi tinggi diperlambat oleh medan listrik inti atom, energinya akan ditransfer dan diemisikan gelombang elektromagnet yang sering disebut efek Bremstrahlung.

2.2.3.2. Interaksi Radiasi Gamma

Interaksi radiasi γ dengan materi yang dalam hal ini adalah detektor sangat banyak macamnya. Namun yang terpenting adalah hasil interaksi itu adalah efek

fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan. Radiasi γ setelah melewati materi akan terabsorpsi secara eksponensial sebanding dengan ketebalannya (Meredith WJ dan Massey JB, 1977).

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (2.25)$$

I adalah intensitas setelah melewati materi, I_0 intensitas mula-mula, d tebal materi penyerap dan μ merupakan konstanta penyerapan yang disebabkan oleh efek fotolistrik, efek Compton dan produksi pasangan.

a. Efek Fotolistrik

Pada efek fotolistrik, sinar γ berinteraksi dengan elektron yang terikat pada atom. Energi sinar γ dipakai elektron untuk melepaskan diri dari ikatan atom sekaligus diubah menjadi energi kinetik untuk bergerak. Dari persamaan energi kuantum $E = h\nu$, secara empiris peristiwa efek fotolistrik dapat dinyatakan (Arthur Beiser, 1989) sebagai :

$$K = h\nu - h\nu_0 \quad (2.26)$$

K merupakan energi kinetik foto elektron, $h\nu$ energi sinar γ dan $h\nu_0$ energi ikat elektron.

Efek fotolistrik dapat terjadi jika energi sinar γ rendah berinteraksi dengan elektron pada atom dengan nomor (Z) besar. Dengan energi rendah sinar γ berinteraksi

dengan elektron orbit luar, bila energinya lebih tinggi akan bereaksi dengan elektron orbit lebih dalam.

Setelah foto elektron dibebaskan dari ikatan atom, untuk mengatur kembali konfigurasi elektron akan terpancar sinar-x atau elektron auger. Tenaga sinar-x diserap oleh foto elektron. Seluruh energi sinar γ sebesar E_γ diserap oleh detektor dan diubah menjadi pulsa yang tingginya sebanding dengan E_γ . Hal ini ditunjukkan dengan munculnya puncak berbentuk Gauss pada nomor salur yang bersesuaian dengan energi E_γ . Puncak ini disebut puncak foto listrik.

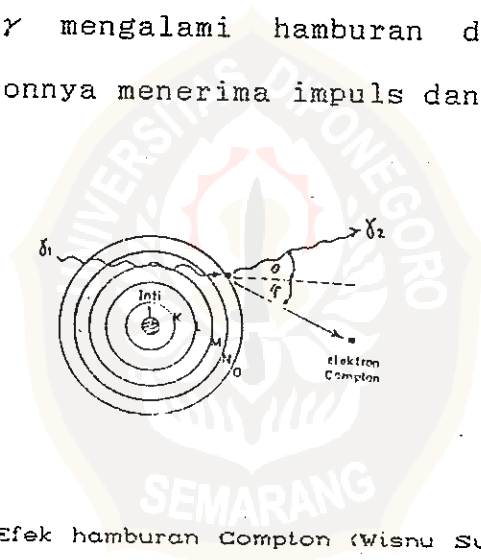
Untuk sinar γ dengan energi yang lebih tinggi, foton-fotonnya mampu menembus kristal detektor lebih dalam. Sehingga sinar-x lebih sukar untuk meloloskan diri dari detektor. Dengan demikian puncak lolos yang timbul hanya untuk energi γ kurang dari 100 keV.

b. Efek Hamburan Compton

Efek hamburan Compton paling banyak terjadi pada sinar γ dengan energi 500 keV sampai 5 MeV dan nomor atom ringan sampai sedang. Pada peristiwa efek Compton ini terjadi pembebasan elektron seperti pada efek fotolistrik dan penghamburan foton dengan panjang gelombang yang berbeda dari pada saat foton datang. Gejala ini pertama kali diamati oleh Arthur H Compton pada awal tahun 1920 untuk membuktikan kuantum radiasi. Compton merumuskan hamburan ini (Arthur Beiser, 1989) sebagai :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi) \quad (2.27)$$

λ' adalah panjang gelombang foton terhambur, λ panjang gelombang datang, h tetapan planck, m_0 masa diam lektron, c kecepatan cahaya dan ϕ besar sudut foton terhambur yang diukur dari arah saat foton datang. Untuk lebih jelasnya penurunan rumus (2.27) bisa dilihat pada lampiran I. Gambar 2.9. menunjukkan peristiwa tumbukan antara foton γ dengan elektron yang mula-mula diam. Setelah terjadi tumbukan, foton γ mengalami hamburan dari arah semula sedangkan elektronnya menerima impuls dan mulai bergerak.



Gb. 2.9. Efek hamburan Compton (Wisnu Susetyo, 1988)

Dari persamaan (2.27) dapat diperoleh besarnya energi foton terhambur dari energi foton datang.

$$E_{\gamma} = \frac{E_0}{\frac{E_0}{m_0 \cdot c^2} (1 - \cos \phi) + 1} \quad (2.28)$$

E_γ adalah tenaga sinar gamma terhambur dan E_o tenaga mula-mula sinar gamma. Agar diperoleh energi elektron Compton, perlu diingat bahwa besarnya energi yang diterima elektron sama dengan kehilangan energi pada sinar gamma.

$$E_e = E_o - E_\gamma \quad (2.29)$$

E_e adalah energi elektron Compton. Dengan memasukkan persamaan (2.28) ke dalam persamaan (2.29) diperoleh besarnya energi elektron tersebut, yaitu :

$$E_e = \frac{\left\{ \frac{E_o^2}{m_o \cdot c^2} \right\} (1 - \cos\phi)}{1 + \left\{ \frac{E_o^2}{m_o \cdot c^2} \right\} (1 - \cos\phi)} \quad (2.30)$$

Pada peristiwa efek hamburan Compton terjadi gejala hamburan maupun serapan. Untuk tenaga sinar gamma $E_\gamma = \pm 1,6$ MeV, kedua gejala mempunyai kebolehjadian yang sama. Sedangkan pada energi $E_\gamma > 1,6$ MeV lebih dominan terjadi serapan dan pada daerah energi $E_\gamma < 1,6$ MeV lebih sering diperoleh hamburan.

Sinar gamma yang terhambur dan meloloskan diri dapat berinteraksi lebih lanjut dengan detektor sampai seluruh tenaga gamma mula-mula E_o diserahkan seluruhnya pada detektor.

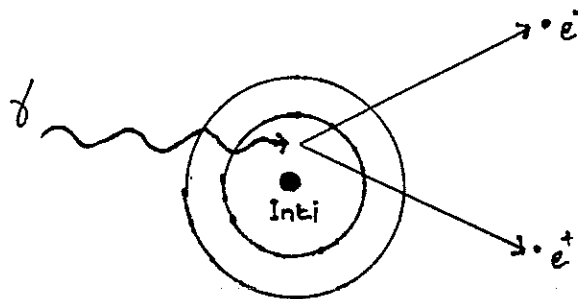
c. Efek Produksi Pasangan

Sebuah foton dapat menyerahkan seluruh atau sebagian energi pada sebuah elektron. Kemungkinan terjadi foton berubah membentuk elektron dan positron, suatu proses perubahan elektromagnetik menjadi energi diam. Besarnya energi diam elektron atau positron adalah 0,511 MeV. Maka energi pembentukan pasangan setidaknya membutuhkan energi sebanyak 1,022 MeV. Setiap energi foton akan menjadi energi kinetik elektron dan positron.

$$E = E_{e^+} + E_e + 2m_0c^2 \quad (2.31)$$

E menunjukkan energi pembentukan pasangan, E_{e^+} energi kinetik positron, E_e energi kinetik elektron dan m_0c^2 adalah energi rihaat elektron sebesar 0,511 MeV.

Efek produksi pasangan banyak terjadi pada foton energi tinggi dan nomor atom (Z) tinggi. Pasangan yang terbentuk dapat berinteraksi lebih lanjut dengan detektor melalui proses foto listrik maupun hamburan Compton. Dapat pula salah satu atau keduanya meloloskan diri keluar dari detektor. Bila hanya salah satu foton yang lolos akan timbul pulsa puncak lolos tunggal yang tingginya setara dengan 0,511 MeV. Sedangkan bila kedua-duanya dapat meloloskan diri dari detektor akan timbul puncak lolos ganda dengan tenaga dua kali lebih besar. Akan tetapi bila tidak ada foton yang meloloskan diri berarti seluruh tenaga sinar gamma sebesar E diserahkan pada detektor.



Gb. 2.10. Produksi Pasangan

2.2.4. Radioaktivitas Lingkungan

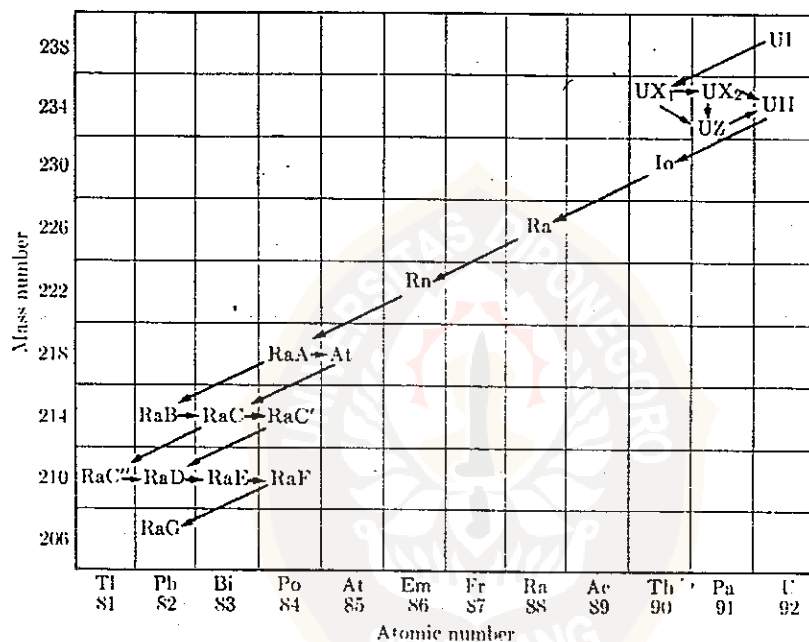
Ada dua sumber radiasi utama yang memberikan sumbangan terhadap radioaktivitas lingkungan. Sumber radiasi itu adalah radiasi alam dan radiasi buatan manusia yang dimanfaatkan untuk kepentingan damai maupun perang.

2.2.4.1. Radiasi Alamiah

Radiasi alamiah berasal dari radiasi kosmis dan radiasi permukaan bumi. Radiasi kosmis datang dari bintang-bintang dan matahari merupakan radiasi kosmis primer. Kemudian berinteraksi dengan atmosfer, sebagian diserap pada 1/10 bagian atas atmosfer. Sekitar 20 km dari lapisan atas atmosfer sudah terbentuk radiasi kosmis sekunder. Sebagian dari radiasi kosmis sekunder ini menuju bumi dan berinteraksi dengan magnet bumi menghasilkan elektron, sinar gamma, neutron dan partikel lainnya. Radionuklida hasil reaksi ini disebut radionuklida

kosmogenik.

Dari permukaan bumi dipancarkan radiasi alamiah yang berasal dari deret Uranium (U-238), deret Thorium (Th-232), K-40, C-14, dan Rb-87. Unsur-unsur tersebut terbentuk pada lapisan kulit bumi bersama-sama terbentuknya bumi dan dikenal dengan radionuklida primordial.



Gb. 2.11. Deret U-238 dan anak luruhnya (Irving Kaplan, 1962)

Uranium dan Thorium umumnya terdapat pada batuan fosfat yang banyak dimanfaatkan untuk pupuk. Dengan demikian Ra-226 juga terdapat di batuan ini.

Apabila ada Uranium dan Thorium, Ra-226 dan Rn-222 tersebar di atmosfer karena difusi. Tingkat radioaktivitas udara terutama disebabkan oleh gas radon dan gas thoron. Sedangkan radionuklida kosmogenik tidak begitu

mempengaruhi karena relatif kecil.

2.2.4.2. Radiasi Buatan Manusia.

Radiasi buatan bersumber pada kegiatan manusia mempergunakan dan atau memproduksi bahan-bahan radioaktif untuk tujuan-tujuan tertentu. Di bidang medis banyak digunakan sinar-x, radioisotop I-131, Cr-51, Co-58, dan Fe-59 untuk diagnosa. Sedangkan untuk terapi penyakit tumor atau kangker digunakan sinar-x, radioisotop Co-60, Cs-137 dan Ra-226. Selain itu dipergunakan I-131, Au-198 dan P-32 untuk diminumkan pada penderita. Pemakaian di bidang industri misalnya penggunaan kamera gamma dengan isotop Ir-192 dan Co-60 untuk pemeriksaan kualitas pengelasan logam dan keretakan pada tembok, pemakaian Ra-226 pada pembuatan jam agar berpendar, serta pembuatan kaos lampu petromaks menggunakan thorium.

Sumber radiasi buatan itu masih tergolong rendah. Selain keperluannya sedikit juga mudah diawasi penggunaannya. Sumber yang lebih berbahaya adalah kecelakaan radiasi pada reaktor dan ledakan senjata nuklir. Akibat dari dua peristiwa ini sejumlah besar zat radioaktif tersebar ke lingkungan dan memberikan kontribusi dosis yang tinggi. Radiasi yang tersebar dapat berupa hasil proses fisi dan aktivasi. Hasil fisi misalnya I-131, Cs-137, Cs-134 dan Sr-90. Sedangkan radionuklida hasil aktivasi contohnya Co-60, C-14, Pu-239.

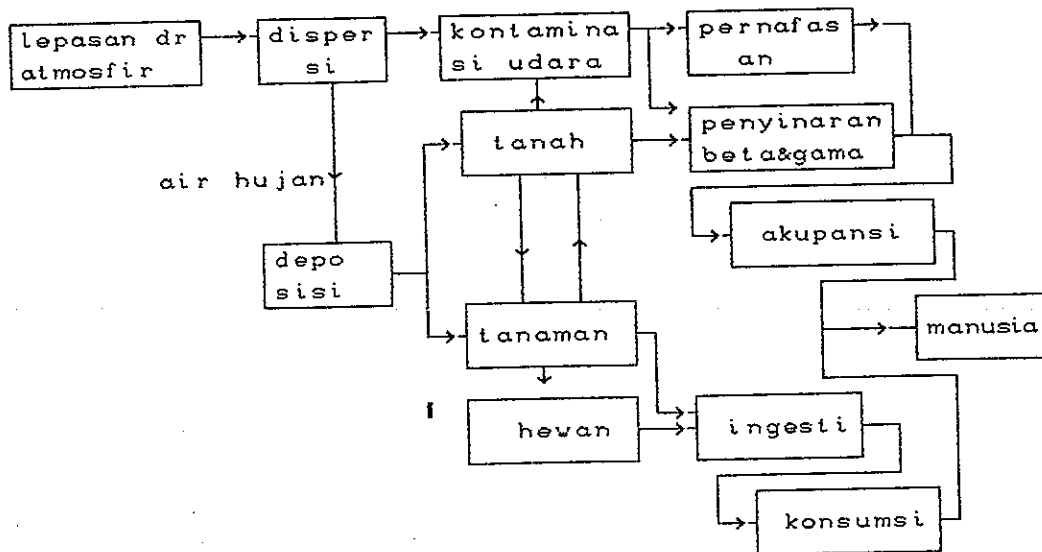
Sejumlah besar material hasil fisi/fusi dan aktivasi

berupa debu dan gas terhambur ke atmosfer mengakibatkan terjadinya jatuhnya debu radioaktif (fall-out). Penghamburan radioaktif membentuk aerosol kemudian jatuh pada daerah radius beberapa ratus kilometer dari titik ledakan nuklir mengakibatkan jatuhnya lokal. Partikel aerosol yang lebih kecil ukurannya terinjeksi ke dalam troposfir dan dapat mengelilingi bumi pada belahan yang sama serta akan dijatuhkan dalam radius ribuan kilometer membentuk jatuhnya troposfir. Partikel aerosol yang paling kecil akan masuk ke dalam stratosfir menimbulkan jatuhnya pada hampir seluruh permukaan bumi. Jatuhan ini dikenal dengan jatuhnya global atau jatuhnya stratosfir.

2.2.4.3. Radioaktivitas pada Manusia

Tubuh manusia dapat terkena radiasi baik dari dalam tubuh (interna) maupun dari luar (externa). Radiasi interna disebabkan oleh masuknya zat radioaktif ke dalam tubuh manusia. Dari luar tubuh radiasi disebabkan karena terjadinya paparan secara langsung.

Setelah diketemukannya radioaktivitas pada lingkungan, sebagian besar radioaktivitas sampai kepada tubuh manusia melalui siklus rantai makanan. Ra-226 masuk tubuh manusia melalui air sebanyak 10 % dan 90 % melalui makanan. Pada gambar 2.12 diperlihatkan alur zat radioaktif dari atmosfer hingga masuk ke dalam tubuh.



Gb. 2.12 Jejak kritik radionuklida dari atmosfer ke lingkungan yang berakhir pada manusia. (Annaliah Ismono, 1993)

