

II.1. Apakah Radioisotop itu ?

Perbedaan komposisi neutron dan proton dalam inti atom tidak saja memberikan perbedaan sifat fisika isotop-isotop yang sejenis (karena massa yang berbeda), tetapi juga mempengaruhi kestabilan dari inti atom. Inti atom yang tidak stabil (sebagai akibat dari komposisi proton dan neutron yang tidak memenuhi syarat kestabilan) mengalami perubahan secara spontan sampai dihasilkan komposisi proton dan neutron yang memberikan kestabilan. Sedangkan inti atom yang telah stabil tidak mengalami perubahan struktur atau perubahan komposisi nukleonnya sepanjang tidak ada pengaruh dari luar. Pertanyaan yang kemudian timbul adalah "Bagaimana mungkin suatu inti atom dapat menjadi sistem yang stabil padahal di dalam inti atom terdapat sejumlah proton yang tentunya akan menghasilkan gaya tolak elektrostatis sehingga harusnya inti atom menjadi tidak stabil?".

Penggabungan nukleon untuk membentuk inti (nuklida) diikuti dengan pembebasan sejumlah energi yang disebut sebagai energi pengikat inti. Energi pengikat inti ini mempunyai korelasi dengan massa dan jumlah nukleon serta massa inti yang dihasilkan dari penggabungan nukleon tersebut, sesuai dengan persamaan Einstein $E = M.C^2$. Dalam besaran massa, energi pengikat inti dinyatakan sebagai *mass defect* (= defek massa = Massa "hilang" = ΔM), yaitu selisih antara total massa nukleon dengan massa inti yang terbentuk :

$$\Delta M = Z.M_P + N.M_N - M_I$$

- M_P = Massa proton
- M_N = Massa neutron
- M_I = Massa inti yang terbentuk
- Z = jumlah proton
- N = jumlah neutron

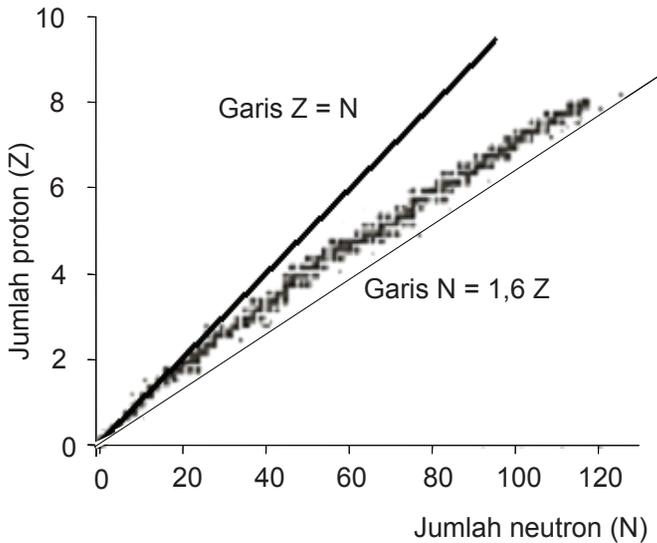
Apabila ΔM dalam gram, energi pengikat inti adalah sebesar $\Delta M \times 5,6.10^{26}$ MeV. Apabila ΔM dalam a.m.u. (satuan massa atom) maka energi pengikat inti adalah sebesar $(\Delta M \times 931,4)$ MeV, sehingga energi pengikat rata-rata per nukleon adalah :

$$\frac{\Delta M \times 931.4 \text{ MeV}}{(Z + N)}$$

Inti atom akan stabil bila energi pengikat inti lebih besar dari gabungan berbagai energi yang memberikan efek ketidakstabilan inti, termasuk antara lain gaya tolak Coulomb antar proton yang disebutkan di atas. Sebaliknya, bila energi pengikat inti tidak melampaui energi yang mendestabilkan inti, maka inti atom akan tidak stabil dan mengalami perubahan struktur inti sampai diperoleh struktur inti yang memenuhi persyaratan kestabilan.

Perubahan struktur inti atau perubahan komposisi proton – neutron dalam inti atom yang tidak stabil berlangsung secara spontan dan diikuti dengan pembebasan sejumlah energi, yang dilepaskan dalam bentuk radiasi. Apabila perubahan komposisi nukleon tersebut belum menghasilkan struktur inti atom yang stabil, maka akan terjadi lagi perubahan komposisi nukleon secara spontan yang disertai lagi dengan pembebasan radiasi, demikian dan seterusnya sampai diperoleh struktur inti dengan komposisi nukleon yang stabil. Peristiwa perubahan struktur inti yang tidak stabil menuju atau menjadi struktur yang stabil ini disebut sebagai **peluruhan**, fenomena yang menyertai peristiwa peluruhan disebut **radioaktivitas** atau **keradioaktifan**, sedangkan radiasi yang dibebaskan dalam peluruhan tersebut dinamakan **radiasi nuklir (sinar inti)**. Waktu yang diperlukan untuk suatu proses peluruhan sebesar separuh dari keradioaktifan mula-mula disebut sebagai **waktu paruh**. Isotop yang tidak stabil dengan demikian merupakan pemancar radiasi nuklir dan disebut sebagai **radioisotop** atau **isotop radioaktif**. Apabila tinjauan dikhususkan pada inti atom yang tidak stabil, maka inti atom yang tidak stabil itu disebut dengan **radionuklida**.

Peristiwa peluruhan suatu radioisotop bersifat karakteristik dan merupakan ciri dari radioisotop tersebut. Karakteristika dan pencirian tersebut menyangkut 3 hal utama, yaitu waktu paruh, jenis radiasi nuklir yang dibebaskan dan energi radiasi nuklir tersebut. Tidak ada sepasang radioisotop berbeda yang mempunyai kesamaan dalam ketiga hal tersebut. Apabila jumlah neutron dan jumlah proton di dalam inti atom diplotkan pada kurva N (sumbu X) vs Z (sumbu Y) maka ternyata inti atom yang stabil menempati daerah kurva yang tertentu yang disebut sebagai pita kestabilan inti (Gambar II.1). Di luar pita kestabilan inti ini isotop bersifat radioaktif dan meluruh untuk pada akhirnya berubah menjadi salah satu isotop dalam pita kestabilan inti.



Gambar II.1. Pita kestabilan inti atom.

Dewasa ini tidak kurang dari 275 inti atom stabil telah dikenal dan diketahui dengan baik. Inti atom stabil ini dapat dikelompokkan dalam 4 kelompok yang dibedakan atas ganjil-genapnya nukleon dalam inti atom, yaitu :

- a). Inti genap-genap, yaitu inti atom dengan jumlah proton genap dan jumlah neutron genap. Kelompok ini terdiri dari 166 jenis inti atom.
- b). Inti genap-ganjil, yaitu inti atom dengan jumlah proton genap dan jumlah neutron ganjil, sebanyak 55 jenis inti atom.
- c). Inti ganjil-genap, yaitu inti atom dengan jumlah proton ganjil dan jumlah neutron genap, sebanyak 50 jenis inti atom.
- d). Inti ganjil-ganjil, yaitu inti atom dengan jumlah proton ganjil dan jumlah neutron juga ganjil, sebanyak 4 buah.

Beberapa faktor diketahui memberikan pengaruh terhadap kestabilan inti atom, yaitu :

1. Proton-proton dan neutron-neutron yang saling berpasangan berpotensi menghasilkan kestabilan yang lebih baik dari pada yang tidak berpasangan (faktor ini mirip dengan dengan orbital elektron yang stabil bila berisi elektron yang berpasangan)
2. Komposisi jumlah neutron dan proton. Pada inti dengan jumlah proton lebih dari 20, inti yang stabil mempunyai neutron lebih banyak dari protonnya untuk menghasilkan gaya tarik antar massa nukleon yang mengatasi gaya tolak Coulomb dari proton.

3. Kapabilitas maksimal yang dimiliki oleh sebuah nukleon untuk berinteraksi dengan sejumlah nukleon lain di sekitarnya. Kapabilitas ini dinyatakan sebagai energi pengikat nukleon (E_B) dengan persamaan eksperimental berikut :

$$E_B \text{ (MeV)} = 14,0 A - 13,1 A^{2/3} - 0,585 Z(Z - 1) A^{-1/3} - 18,1 (A - 2Z)^2 A^{-1} + \delta A^{-1}$$

dengan

A = jumlah proton dan neutron,

Z = jumlah proton,

δ = suatu tetapan.

Persamaan energi pengikat nukleon yang ditunjukkan pada persamaan di atas mempunyai arti khusus dalam kaitannya untuk memahami faktor-faktor yang dapat mempengaruhi besarnya energi pengikat nukleon dan dengan demikian berarti mempengaruhi kestabilan inti atom. Faktor-faktor tersebut ditunjukkan dengan variabel jumlah proton (Z) dan jumlah neutron (N) dalam masing-masing suku pada persamaan energi pengikat nukleon tersebut di atas.

Suku pertama mengandung faktor A yaitu jumlah proton (Z) dan neutron (N), menunjukkan bahwa semakin besar jumlah nukleon dalam inti atom semakin besar pula akumulasi energi ikat antara satu nukleon dengan nukleon lainnya. Suku kedua berkaitan dengan keberadaan nukleon pada permukaan atau batas luar inti atom, yang berarti bahwa nukleon-nukleon tersebut akan dipengaruhi oleh energi pengikat nukleon yang lebih kecil dibandingkan dengan nukleon yang berada di bagian dalam inti atom sebab nukleon permukaan ini mempunyai permukaan atau bagian yang tidak mengalami interaksi dengan nukleon lainnya. Karena itu diperlukan koreksi bertanda negatif yang sebanding dengan luas permukaan inti, dan ini sebanding dengan $A^{2/3}$. Suku yang ketiga berkaitan dengan gaya tolak elektrostatis antara masing-masing proton dengan ($Z-1$) proton lainnya. Gaya tolak ini memberikan efek ketidakstabilan sehingga suku ketiga bertanda negatif, sebanding dengan faktor $Z(Z-1)$ serta sebanding dengan radius inti dan ini sebanding dengan faktor $A^{-1/3}$. Suku keempat mempunyai kemiripan dengan prinsip Larangan Pauli untuk penempatan elektron di dalam orbital atom, yaitu bahwa sesama proton atau sesama neutron tidak dapat menempati tingkat kuantum yang sama, tetapi pasangan proton-neutron dapat berada pada tingkat kuantum yang sama. Ini berarti bahwa kelebihan proton atau neutron, yang dapat ditunjukkan dengan besaran $|N - Z|$ atau $|A - 2Z|$, akan menghasilkan faktor koreksi negatif karena kelebihan tersebut akan menghasilkan pasangan proton-proton atau neutron-neutron. Faktor koreksi ini disebut sebagai faktor koreksi asimetri dan sebanding dengan $(A - 2Z)^2 A^{-1}$. Suku kelima

adalah konsekuensi dari genap atau ganjilnya proton dan neutron untuk jumlah nukleon sebesar A . Faktor koreksi ini bertanda positif ($\delta = +132$) untuk inti genap-genap, dan bertanda negatif ($\delta = -132$) untuk inti ganjil-ganjil. Untuk inti genap-ganjil dan inti ganjil-genap harga tetapan $\delta = 0$. Faktor koreksi (δA^{-1}) ini disebut faktor koreksi pasangan.

Semua unsur yang telah diketemukan di alam dengan nomor atom lebih besar dari 83 merupakan unsur-unsur radioaktif. Unsur-unsur ini merupakan bagian mata rantai peluruhan alami yang menjadi sumber utama keradioaktifan di alam. Ada 3 mata rantai peluruhan di alam yang dikenal dengan deret peluruhan Uranium atau deret peluruhan ($4n + 2$) yang berasal dari radioisotop ^{238}U dan berakhir dengan isotop stabil ^{206}Pb , deret peluruhan Actinium atau deret peluruhan ($4n + 3$) yang berasal dari radioisotop ^{235}U dan berakhir dengan isotop stabil ^{207}Pb dan deret peluruhan Thorium atau deret peluruhan ($4n$) yang berasal dari radioisotop ^{232}Th dan berakhir dengan isotop stabil ^{208}Pb . Ketiga deret peluruhan radioisotop alam tersebut ditunjukkan pada Gambar II.2, Gambar II.3 dan Gambar II.4.

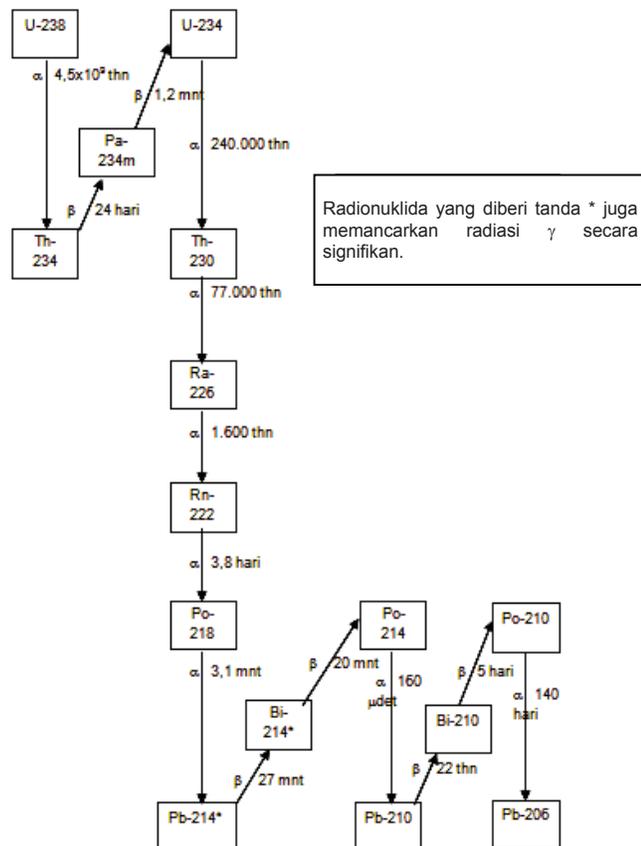
Sampai dengan tahun 1906-an, semua keradioaktifan di alam dianggap berasal dari ketiga deret peluruhan tersebut di atas. Keradioaktifan alami ini tidak akan pernah habis karena banyak radioisotop alam yang mempunyai waktu paruh sangat panjang. Selain ketiga deret peluruhan di atas, dikenal pula deret peluruhan Neptunium atau deret peluruhan ($4n + 1$) yang berasal dari ^{237}Np dan berakhir pada isotop stabil ^{209}Bi . Tetapi deret peluruhan ini tidak lagi dianggap sebagai deret peluruhan alam karena waktu paruh terpanjang hanya $2,2 \times 10^6$ tahun (^{237}Np), sementara umur alam semesta telah mencapai lebih dari 3×10^9 tahun.

Pada tahun 1906 ditemukan adanya keradioaktifan β energi lemah pada unsur K (^{40}K) dan Rb (^{87}Rb), dan selama 25 tahun berikutnya hanya dua unsur itulah yang dianggap sebagai keradioaktifan alam di luar deret peluruhan yang disebutkan di atas. Baru pada tahun 1932, ditemukan lagi adanya keradioaktifan unsur Sm (^{147}Sm), dan kemudian ditemukan semakin banyak lagi unsur radioaktif di alam di luar deret peluruhan alami di atas.

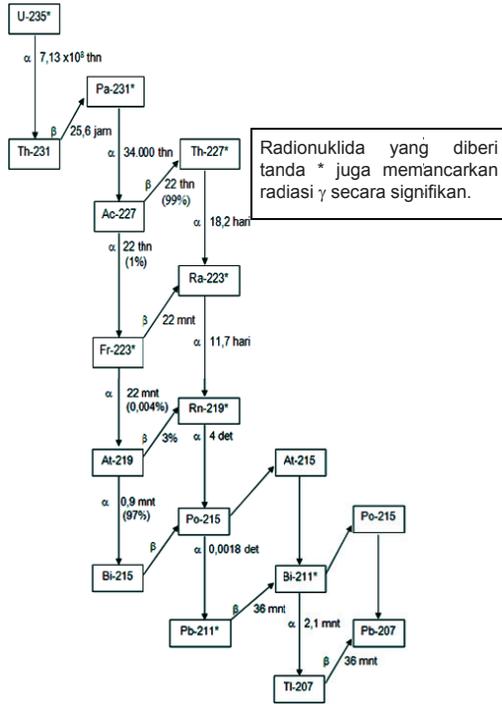
Sumber radioisotop alam juga berasal dari reaksi kosmis di jagad raya. Radiasi energi tinggi dari sinar matahari dapat menyebabkan terjadinya berbagai reaksi nuklir yang menghasilkan radioisotop alam, antara lain ^3H , ^7Be dan ^{10}Be . Pada Tabel II.1 disajikan beberapa radioisotop alam yang bukan merupakan bagian dari ketiga deret peluruhan radioisotop alam yang telah disebutkan di atas dan memberikan kontribusi pada persentase kelimpahan isotop alam karena waktu paruh yang sangat panjang.

Tabel II.1. Beberapa radioisotop alam di luar deret perubahan radioisotop alam.

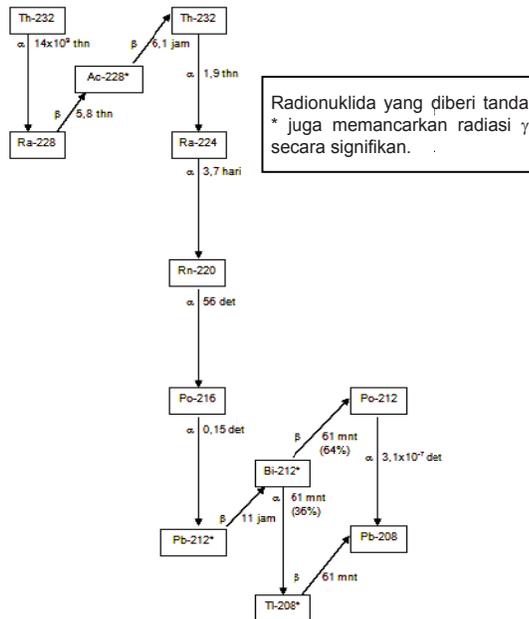
RADIOISOTOP	WAKTU PARUH (tahun)	KELIMPAHAN (%)	PRODUK STABIL HASIL PELURUHAN
K-40	$1,27 \times 10^9$	0,012	Ca-40, Ar-40
V-50	6×10^{15}	0,24	Cr-50, Ti-50
Rb-87	$5,7 \times 10^{10}$	27,8	Sr-87
In-115	5×10^{14}	95,7	Sn-115
Te-123	$1,2 \times 10^{13}$	0,87	Sb-123
Nd-144	$2,4 \times 10^{15}$	11,07	Ce-140
Hf-174	2×10^{15}	0,18	Yb-170
Re-187	6×10^{10}	62,9	Os-187
Pt-190	7×10^{11}	0,013	Os-186



Gambar II.2. Deret peluruhan Uranium.



Gambar II.3. Deret peluruhan Actinium.



Gambar II.4. Deret peluruhan Thorium.

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di luar bidang kimia dan fisika, misalnya di bidang kedokteran, pertanian, hidrologi dan lain-lainnya, menimbulkan kebutuhan akan tersedianya jenis radioisotop baru yang justru tidak terdapat di alam. Pemahaman bahwa pada dasarnya suatu isotop baru dapat dibuat melalui reaksi inti terhadap isotop yang sudah ada sebelumnya (suatu fenomena yang membuktikan adanya kekeliruan pada teori atom Dalton) mendorong upaya teknologi untuk membuat radioisotop yang tidak disediakan oleh alam. Penemuan unsur-unsur radioaktif nomor atom 93 sampai 96 dan unsur-unsur radioaktif hasil fisi (pembelahan inti atom) ^{235}U merupakan contoh karya besar dalam memperkaya jenis radioisotop buatan. Teknologi proses radiokimia yang dipelopori oleh Marie Curie, fenomena reaksi aktivasi inti dengan berkas neutron yang ditemukan pertama kali oleh Louis Fermi serta fenomena proses fisi (pembelahan inti atom radioaktif) yang dibuktikan oleh Otto Hahn menjadi titik awal bagi berbagai penelitian yang sampai sekarang telah memperkaya unsur-unsur dalam Peta Berkala Modern. Seiring pula dengan perkembangan teknologi instrumentasi nuklir, maka identifikasi unsur-unsur radioaktif waktu paruh pendek menjadi semakin mungkin dilakukan, dan hal ini semakin mendorong penemuan radioisotop buatan jenis baru. Pada dasarnya pembuatan radioisotop adalah pengubahan komposisi nukleon dalam inti atom isotop yang digunakan sebagai bahan dasar. Fenomena yang terjadi adalah suatu reaksi nuklir (reaksi inti) yang membuktikan bahwa suatu atom yang tertentu dapat diubah menjadi atom yang lainnya.

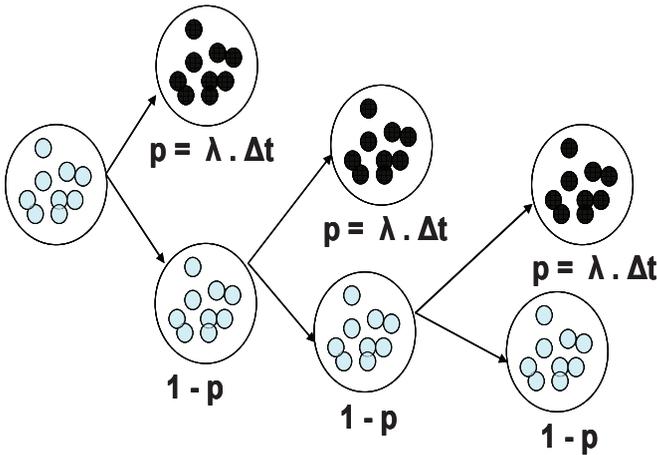
II.2. Fenomena Keradioaktifan dan Radiasi Nuklir

Peristiwa peluruhan merupakan fenomena acak dan statistikal. Sebuah atom dari unsur radioaktif mempunyai kemungkinan untuk mengalami peluruhan (perubahan komposisi nukleon atau partikel pembentuk inti atom) sebesar p dalam selang waktu Δt , tidak bergantung pada keadaan atom tersebut. Kemungkinan peluruhan tersebut hanya bergantung pada interval waktu Δt tersebut. Dengan demikian berlaku hubungan $p = \lambda \cdot \Delta t$ dengan λ adalah tetapan karakteristik dari spesi atom radioaktif yang terkait dan disebut tetapan peluruhan.

Kemungkinan suatu radioisotop untuk tidak meluruh selama selang waktu Δt dengan demikian adalah $1 - p$, sehingga $1 - p = 1 - \lambda \cdot \Delta t$

Kemungkinan radioisotop tersebut untuk tidak meluruh selama selang waktu Δt yang ke 2 adalah juga $1 - \lambda \cdot \Delta t$. Secara berkelanjutan maka kemungkinan untuk tidak meluruh sejak selang waktu Δt yang pertama sampai selang waktu Δt yang ke n adalah sebesar $(1 - \lambda \cdot \Delta t)^n$.

Peristiwa peluruhan radioisotop (atau radionuklida) yang diuraikan di atas secara skematik dapat ditunjukkan pada Gambar II.5.



Gambar II.5. Kebolehjadian peluruhan pada setiap selang waktu Δt .

Bila $n \cdot \Delta t = t$ maka kemungkinan radioisotop untuk tidak meluruh adalah sebesar $(1 - \lambda \cdot t/n)^n$. Selanjutnya bila jumlah atom mula-mula adalah N_0 dan sisa atom yang tidak meluruh setelah waktu t adalah N_t maka berlaku hubungan berikut :

$$N_t / N_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 - \lambda \cdot t/n)^n = e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (\text{persamaan peluruhan}).$$

Waktu paruh $t_{1/2}$ adalah waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh hubungan $N_t = N_0/2$, sehingga :

$$N_0/2 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} \Rightarrow \ln 1/2 = -\lambda \cdot t_{1/2} \Rightarrow t_{1/2} = \ln 2/\lambda \Rightarrow t_{1/2} = 0,693/\lambda$$

Karena kuantitas keradioaktifan (= laju peluruhan, A) sebanding dengan jumlah atom radioaktif (N) maka berlaku hubungan berikut :

$$\text{Keradioaktifan pada waktu } t = A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\text{Atau : } \ln (A_t/A_0) = - (t/t_{1/2}) \cdot \ln 2 \Rightarrow (A_t/A_0) = (1/2)^{t/t_{1/2}}$$

Satuan untuk besaran keradioaktifan (A) adalah curie (Ci) atau becquerel (Bq) yang didefinisikan sebagai berikut :

1 Bq = 1 proses peluruhan per detik

1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ proses peluruhan per detik = $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

Apabila lebih dari satu macam sediaan radioaktif berada dalam satu campuran, maka masing-masing zat akan mengalami peluruhan tanpa tergantung satu dengan lainnya. Perubahan keradioaktifan total memenuhi penjumlahan aljabar peluruhan masing-masing komponen.

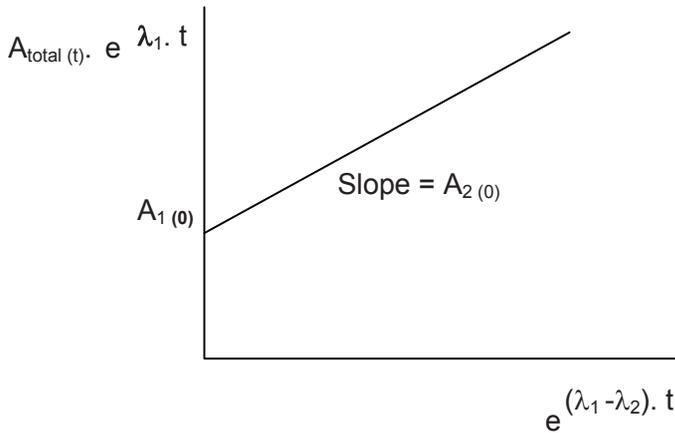
$$\begin{aligned}
A_{\text{total}}(t) &= \sum_{i=1}^n A_i(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i(t) \\
&= \sum_{i=1}^n A_{i(0)} \cdot e^{-\lambda_i \cdot t} \\
&= \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_{i(0)} \cdot e^{-\lambda_i \cdot t}
\end{aligned}$$

Sebagai ilustrasi sederhana, berikut ini ditampilkan keradioaktifan campuran dua zat radioaktif.

$$\begin{aligned}
A_{\text{total}}(t) &= \sum_{i=1}^2 A_i(t) \\
&= A_{1(0)} \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t} + A_{2(0)} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t}
\end{aligned}$$

$$\begin{array}{c}
A_{\text{total}}(t) \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} = A_{1(0)} + A_{2(0)} \cdot e^{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot t} \\
\hline
y = a + b \cdot x
\end{array}$$

Diperoleh hubungan linier antara $A_{\text{total}}(t) \cdot e^{\lambda_1 \cdot t}$ dengan $e^{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot t}$ seperti pada Gambar II.6, yang memberikan keradioaktifan awal masing-masing radionuklida.



Gambar II.6. Keradioaktifan awal komponen campuran 2 radionuklida.

Radiasi nuklir, yang dibebaskan pada fenomena keradioaktifan, merupakan konsekuensi hukum kekekalan energi pada perubahan struktur inti atom. Ketika terjadi perubahan struktur inti atom, yang berarti perubahan komposisi nukleon, sebagian energi massa terbebaskan dalam bentuk radiasi nuklir. Ada 3 jenis radiasi nuklir yang utama, yaitu radiasi α , radiasi β , dan radiasi γ . Radiasi β dibedakan antara positron (β^+) dan negatron (β^-). Radiasi α dan radiasi β sering dipandang sebagai partikel, sedangkan radiasi γ lebih dipandang sebagai foton. Sinar X banyak mempunyai kemiripan dengan radiasi γ , namun tidak termasuk radiasi nuklir karena tidak berasal dari adanya perubahan struktur inti atom melainkan berasal dari terjadinya perubahan struktur elektron di luar inti atom. Beberapa karakteristik penting dari radiasi nuklir ditunjukkan pada Tabel II.2 berikut ini.

Tabel II.2. Karakteristika penting radiasi nuklir.

JENIS RADIASI		MASSA (a.m.u)	MUATAN	DAYA TEMBUS	
NAMA	LAMBANG			DI UDARA	DI TUBUH
Alpha	α	4	+2	0,03 m	0,04 mm
Beta (Negatron)	β (β^-)	1/1836	-1	3 m	5 mm
Positron	ρ (β^+)	1/1836	+1	3 m	5 mm
Gamma	γ	0	0	Sangat besar	Menembus

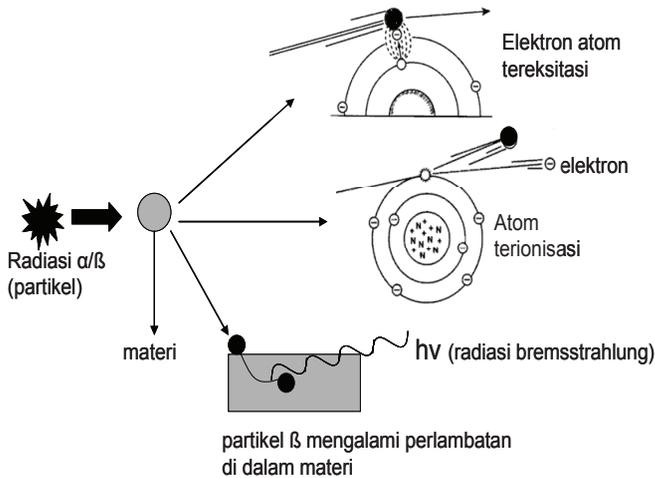
II.3. Interaksi Radiasi Nuklir dengan Materi

Semua jenis radiasi nuklir tidak dapat dilihat, tidak berbau, tidak dapat diraba dan tidak bersuara, namun dalam dosis dan intensitas yang tinggi radiasi nuklir dapat menimbulkan bahaya yang sangat beragam. Hal mendasar yang membedakan radiasi nuklir dengan cahaya atau sinar tampak adalah bahwa sinar tampak tidak mengionkan materi sedangkan radiasi nuklir (dan juga sinar X) mempunyai kemampuan mengionkan materi sehingga radiasi nuklir dan sinar X dikategorikan sebagai radiasi pengion, sedangkan sinar tampak bukanlah radiasi pengion. Walaupun tidak terlihat, tidak bersuara, tidak berbau dan tidak dapat diraba, tetapi keberadaan radiasi nuklir dapat dideteksi dan dapat diukur karena interaksi radiasi nuklir dengan materi menghasilkan respon yang dapat diukur. Interaksi ini mengakibatkan perpindahan sebagian atau seluruh energi dari radiasi nuklir ke materi.

Paling sedikit ada 4 hal utama yang mendorong pentingnya pemahaman tentang mekanisme interaksi radiasi nuklir dengan materi, yaitu :

- (i). Interaksi radiasi nuklir dengan jaringan atau organ tubuh dapat menimbulkan bahaya yang sangat beragam, bahkan dapat berakibat kematian.
- (ii). Interaksi radiasi nuklir dengan materi merupakan fenomena yang menjadi dasar teknik deteksi radiasi pengion.
- (iii). Jenis dan derajat interaksi radiasi nuklir dengan materi merupakan faktor primer dalam menentukan sistem perlindungan yang diperlukan.
- (iv). Interaksi radiasi nuklir dengan materi mendasari pemanfaatan radioisotop dan radiasi nuklir dalam berbagai bidang kehidupan dan kesejahteraan.

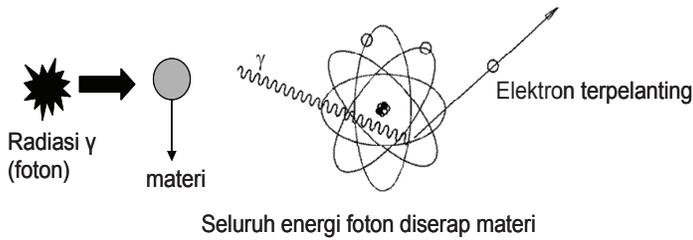
Secara garis besar dikenal 4 fenomena dalam interaksi radiasi nuklir dengan materi, yaitu tumbukan tak elastik, efek fotolistrik, efek Compton dan pembentukan pasangan. Tumbukan tak elastik terutama terjadi pada interaksi radiasi nuklir sebagai partikel dengan atom materi, sedangkan 3 fenomena lainnya terutama terjadi pada interaksi radiasi nuklir sebagai foton dengan atom materi. Pada Gambar II.7 ditunjukkan skematik interaksi tumbukan tak elastis antara radiasi nuklir sebagai partikel dengan atom materi.



Gambar II.7. Fenomena tumbukan tak elastik radiasi nuklir sebagai partikel dengan materi.

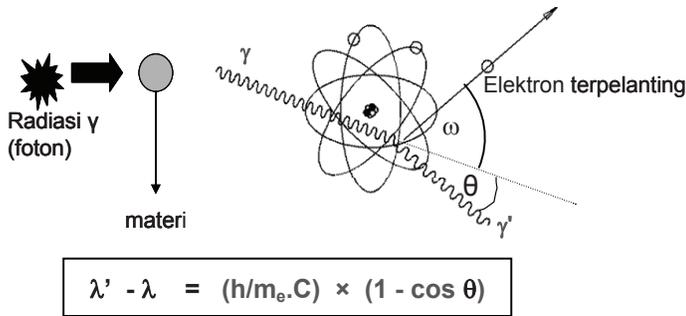
Ada 3 kemungkinan dapat terjadi sebagai akibat dari tumbukan tak elastik ini. Yang pertama adalah eksitasi elektron atom materi ke tingkat energi yang lebih tinggi, dan ketika elektron tersebut kembali ke tingkat energi dasar akan dilepaskan radiasi dalam bentuk sinar X. Yang kedua terjadi ionisasi atom materi yaitu apabila energi radiasi nuklir cukup besar untuk dapat melepaskan elektron dari orbital atom materi. Kemungkinan yang ketiga terjadi apabila radiasi nuklir mempunyai energi yang lebih besar lagi sehingga setelah tumbukan masih dapat terus bergerak di dalam materi tetapi akan mengalami perlambatan dan melepaskan sebagian energinya dalam bentuk radiasi yang disebut radiasi bremstrahlung.

Pada Gambar II.8 ditunjukkan terjadinya efek fotolistrik ketika radiasi nuklir sebagai foton berinteraksi dengan materi dan memindahkan seluruh energinya kepada materi. Radiasi nuklir dengan energi yang lebih besar dari energi ionisasi atom materi memelantingkan elektron atom materi sehingga elektron terlepas dari atom dengan energi kinetik E_K sebesar selisih energi foton E_γ dan energi ionisasi E_I . Efek fotolistrik ini dominan pada radiasi foton dengan energi sampai sekitar ratusan keV. Seluruh energi radiasi terserap dalam materi dan apabila energi radiasi masih melebihi energi ionisasi maka kelebihan energi tersebut menjadi energi kinetik elektron yang bila mencukupi akan menghasilkan efek fotolistrik yang berturutan.



Gambar II.8. Fenomena efek fotolistrik.

Di atas rentang energi untuk menghasilkan efek fotolistrik, interaksi radiasi foton dengan materi akan menghasilkan efek Compton seperti ditunjukkan pada Gambar II.9. Radiasi nuklir yang mempunyai energi lebih besar tidak hanya memelantingkan elektron atom materi, tetapi juga masih menyimpan sebagian energinya sehingga radiasi nuklir masih tetap terlepas dengan mengalami pembelokan arah dari arah datang mula-mula.



Gambar II.9. Fenomena efek Compton.

Pemberlakuan hukum kekekalan energi dan kekekalan momentum menghasilkan 3 buah persamaan berikut ini :

(i). Kekekalan energi : $E_{\gamma} + E_0 = E_{\gamma'} + (E_0^2 + C^2 \cdot p^2)^{1/2}$

(ii). Kekekalan momentum arah sumbu X (searah foton datang) :

$$\frac{E_{\gamma}}{C} = \frac{E_{\gamma'}}{C} \cdot \cos \theta + p \cdot \cos \omega$$

(iii). Kekekalan momentum arah sumbu Y (tegak lurus arah foton datang) :

$$\frac{E_{\gamma'}}{C} \cdot \sin \theta = p \cdot \cos \omega$$

dengan E_γ = energi radiasi foton mula-mula, E_γ' = energi foton terhambur (setelah interaksi), E_0 = energi diam elektron ($= m_e \cdot C^2$), C = kecepatan cahaya, m_e = massa elektron, p = momentum elektron, θ = penyimpangan arah radiasi nuklir terhambur terhadap arah radiasi foton datang, ω = penyimpangan arah elektron terpelanting terhadap arah radiasi foton datang.

Penyelesaian ketiga persamaan di atas akan menghasilkan eliminasi besaran sudut hamburan elektron (ω) untuk menghasilkan persamaan hamburan Compton :

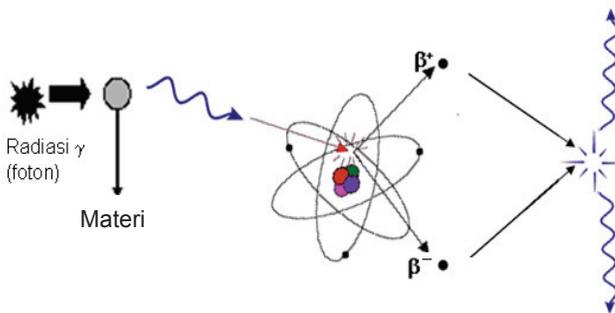
$$1/E_\gamma' - 1/E_\gamma = (1/m_e \cdot C^2) \times (1 - \cos \theta)$$

atau :

$$\lambda' - \lambda = (h/m_e \cdot C) \times (1 - \cos \theta)$$

dengan λ' = panjang gelombang radiasi foton terhambur (setelah interaksi), λ = panjang gelombang radiasi foton datang (mula-mula), dan h = tetapan Planck.

Radiasi nuklir sebagai foton yang mempunyai energi lebih besar dari 1,022 MeV berinteraksi dengan materi dan membentuk pasangan positron dan negatron (= elektron). Energi minimal sebesar 1,022 MeV sesuai dengan total energi diam positron dan elektron yang masing-masingnya adalah 0,511 MeV. Positron dan elektron yang terbentuk segera bergabung kembali dan berubah menjadi dua kuantum foton dengan arah berlawanan, berenergi masing-masing 0,511 MeV. Proses penggabungan kembali positron dan elektron ini disebut proses anihilasi, dan radiasi foton yang dihasilkan disebut radiasi anihilasi. Radiasi anihilasi ini selanjutnya dapat kehilangan energinya melalui efek fotolistrik ataupun efek Compton. Apabila energi radiasi foton mula-mula lebih dari 1,022 MeV, kelebihan energi tersebut akan terdistribusi sebagai energi kinetik inti atom materi dan pasangan positron – elektron. Pada Gambar II.10 ditunjukkan fenomena pembentukan pasangan ketika radiasi nuklir berupa foton dengan energi lebih atau sama dengan 1,022 MeV berinteraksi dengan materi yang menghasilkan perubahan foton menjadi pasangan positron (β^+) dan negatron (= elektron = β^-) dan diikuti dengan proses anihilasi.

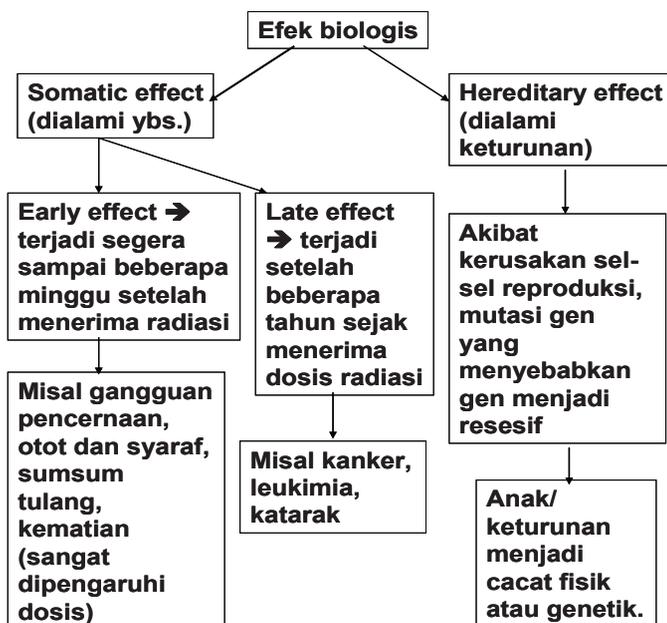


Gambar II.10. Fenomena pembentukan pasangan positron dan negatron.

II.4. Efek Biologis dari Radiasi Nuklir

Interaksi radiasi nuklir dengan bagian atau organ tubuh dapat terjadi sebagai akibat dari adanya sumber radiasi nuklir secara eksternal (di luar tubuh) maupun secara internal (di dalam tubuh). Interaksi tersebut dapat memberikan efek biologis yang lebih lanjut akan memberikan dampak gejala klinis yang secara kuantitatif sangat tergantung pada jumlah dan laju paparan radiasi yang diserap. Secara garis besar efek biologis dari radiasi nuklir dibedakan dalam 2 klasifikasi, yaitu efek somatik (*somatic effect*) dan efek turunan (*hereditary effect*), seperti ditunjukkan pada Gambar II.11.

Efek somatik adalah efek radiasi yang dirasakan dan terjadi pada personel yang menerima dosis radiasi, dapat terjadi segera setelah personel yang bersangkutan menerima radiasi (*early effect*), dapat juga baru terasa beberapa waktu, bahkan sampai beberapa tahun kemudian, setelah penerimaan radiasi (*late effect*). Sedangkan efek turunan terjadi dan dirasakan pada keturunan dari personel yang menerima dosis radiasi, sebagai akibat terjadinya perubahan genetik pada personel penerima radiasi.



Gambar II.11. Ringkasan efek biologis dari radiasi nuklir.

Pemahaman mengenai efek biologis dari radiasi nuklir juga dibedakan dalam 2 hal yaitu efek stokastik (*stochastic effect*) dan efek non-stokastik (*non-stochastic effect*). Efek stokastik adalah efek yang

kebolehjadian terjadinya (dan bukan berat-ringannya efek tersebut) merupakan fungsi dari dosis radiasi, misalnya terjadinya kanker akibat radiasi nuklir. Sedangkan efek non-stokastik adalah efek yang derajat berat-ringannya tergantung pada dosis radiasi sehingga terdapat suatu nilai ambang dosis radiasi yang menyebabkan efek tersebut terjadi atau timbul, misalnya terjadinya katarak akibat radiasi.

Setiap makhluk hidup mengandung struktur sel yang dibangun oleh inti sel yang dikelilingi oleh sitoplasma. Sitoplasma merupakan cairan yang mengandung berbagai konstituen elemen utama pembentuk sel, dan secara keseluruhan cairan tubuh menempati porsi volum yang dominan dari total volume tubuh. Karena itu Interaksi radiasi nuklir dengan sel tubuh akan menyebabkan terjadinya ionisasi molekul air (yang merupakan elemen terbesar dalam sel) dan ini akan menghasilkan berbagai spesi kimia yang reaktif yang dapat menimbulkan gangguan pada konstruksi dan fungsi sel.

Proses yang menghasilkan kerusakan biologis akibat radiasi nuklir berlangsung sangat kompleks, namun dalam banyak hal tahapan efek biologis dari radiasi nuklir dapat disederhanakan dengan menyatakannya dalam 4 tahapan proses, yaitu :

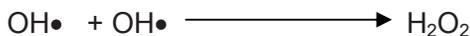
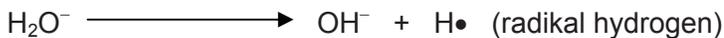
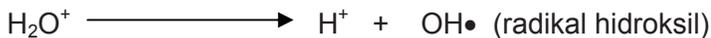
a). Tahap inisiasi fisik.

Tahapan awal ini berlangsung dalam waktu yang sangat singkat setelah terjadinya penyerapan energi radiasi (sekitar 10^{-16} detik), menghasilkan ionisasi molekul air dalam sel :



b). Tahap fisiko-kimia.

Berlangsung sekitar 10^{-6} detik. Pada tahap ini ion-ion yang terjadi saling bereaksi atau terdisosiasi menghasilkan spesi ion baru yang melakukan tahapan fisiko-kimia lanjut serta radikal-radikal bebas yang sangat reaktif dan dapat membentuk senyawa peroksida yang bersifat oksidator kuat.



c). Tahap proses kimia.

Berlangsung dalam orde beberapa detik. Pada tahapan ini produk-produk tahapan sebelumnya bereaksi dengan molekul-molekul organik di dalam sel, misalnya molekul kromosom, yang menyebabkan kerusakan atau pemutusan ikatan dalam molekul-molekul tersebut.

d). Tahap proses biologis.

Berlangsung dalam rentang skala waktu yang sangat lebar, dari sekitar puluhan menit sampai puluhan tahun. Pada tahapan ini, apa yang telah terjadi pada tahap-tahap sebelumnya mulai menunjukkan dampak kerusakan biologis pada individual atau kelompok sel, seperti misalnya kematian sel, penghambatan pembelahan sel dan bahkan perubahan permanen struktur dan konstruksi sel.