

III.1. Jenis-jenis Peluruhan

Radioisotop (atau radionuklida) mengalami peluruhan menghasilkan isotop (atau nuklida) baru, mungkin berupa nuklida stabil atau mungkin juga masih radioaktif. Radionuklida yang mengalami peluruhan disebut radionuklida induk, sedangkan hasil peluruhannya disebut (radio)nuklida anak. Peluruhan merupakan peristiwa spontan yang bersifat acak sehingga hanya dapat diprediksikan terhadap sekumpulan radionuklida tertentu secara rata-rata dan tidak dapat diprediksikan terhadap satu radionuklida secara individual.

Setiap jenis radionuklida meluruh dengan laju peluruhan yang spesifik dan tetap, tidak dipengaruhi oleh proses fisika maupun proses kimia. Laju peluruhan ini menyatakan jumlah peluruhan (atau jumlah transformasi inti) yang terjadi per detik. Besaran ini ekuivalen dengan besaran keradioaktifan suatu radionuklida (lihat juga Bab II.2) dan dinyatakan dengan satuan becquerel (Bq), sehingga pengertian 1 Bq adalah 1 peluruhan per detik. Karena satuan Bq merupakan ukuran yang sangat kecil, maka sering digunakan satuan yang merupakan kelipatan eksponensial dari Bq, yaitu TBq (terabecquerel, 10^{12} Bq), GBq (gigabecquerel, 10^9 Bq) dan MBq (megabecquerel, 10^6 Bq). Juga masih sering digunakan satuan curie (Ci) yang digunakan untuk mendefinisikan kuantitas keradioaktifan dari 1 gram Ra-226. Satuan Ci ini ekuivalen dengan $3,7 \times 10^{10}$ peluruhan per detik, sehingga $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ atau $1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$.

Beberapa jenis radionuklida meluruh melalui lebih dari satu model peluruhan dengan intensitas masing-masing peluruhan mempunyai perbandingan yang tetap, menghasilkan lebih dari satu macam nuklida atau radionuklida baru. Pada Tabel III.1 disajikan jenis peluruhan yang telah banyak dikenali. Tidak semua jenis peluruhan yang disebutkan dalam Tabel III.1 dibahas lebih lanjut dalam Bab ini. Secara umum pembahasan peluruhan radionuklida di sini mengelompokkan model peluruhan dalam 3 kelompok, yaitu peluruhan α , peluruhan β , dan peluruhan γ .

Tabel III.1. Jenis-jenis peluruhan radionuklida.

JENIS PELURUHAN	KOMPOSISI NUKLEON		KETERANGAN
	NUKLIDA INDUK	NUKLIDA ANAK	
Peluruhan α	(A,Z)	(A - 4, Z - 2)	Memancarkan radiasi α
Emisi proton	(A,Z)	(A - 1, Z - 1)	Melepaskan proton
Emisi neutron	(A,Z)	(A - 1, Z)	Melepaskan neutron
Emisi proton ganda	(A,Z)	(A - 2, Z - 2)	Melepas 2 proton secara serentak
Fissi spontan (Salah satu jenis peluruhan dari radionuklida dengan nomor massa tinggi yang menyertai jenis peluruhan lainnya, misal peluruhan α atau peluruhan β^-)	($\geq 230, \geq 90$)	Variatif	Secara teoritis dapat terjadi pada radionuklida nomor massa di atas 100, tetapi secara riil hanya terjadi pada radionuklida nomor massa $A \geq 230$, dan harga $Z \geq 90$. Peluruhan ini menghasilkan 2 atau lebih nuklida baru serta membebaskan neutron yang memungkinkan terjadinya reaksi inti berantai.
Peluruhan <i>cluster</i> (nuklida rangkap)	(A,Z)	(A - A_1 , Z - Z_1) dan (A_1 , Z_1)	Menghasilkan 2 macam nuklida baru
Peluruhan β^- atau emisi negatron	(A,Z)	(A, Z + 1)	Melepaskan radiasi β^- (= negatron)
Peluruhan β^+ atau emisi positron	(A,Z)	(A, Z - 1)	Memancarkan radiasi β^+ (= positron)
Penangkapan elektron	(A,Z)	(A, Z - 1)	Radionuklida induk menangkap elektron orbital
Peluruhan β^- rangkap	(A,Z)	(A, Z + 2)	Serentak melepaskan 2 elektron (2 negatron)
Penangkapan elektron rangkap	(A,Z)	(A, Z - 2)	Radionuklida induk menangkap 2 elektron orbital
Penangkapan elektron disertai emisi positron	(A,Z)	(A, Z - 2)	Radionuklida induk menangkap 1 elektron orbital dan melepaskan 1 positron
Emisi positron rangkap	(A,Z)	(A, Z - 2)	Melepaskan 2 positron secara serentak
Peluruhan γ (transisi isomerik)	(A,Z)	(A,Z)	Memancarkan radiasi γ (foton)
Konversi internal elektron	(A,Z)	(A,Z)	Radionuklida metastabil memindahkan energinya pada elektron orbital yang kemudian terlepas dari atom

III.2. Peluruhan Alpha

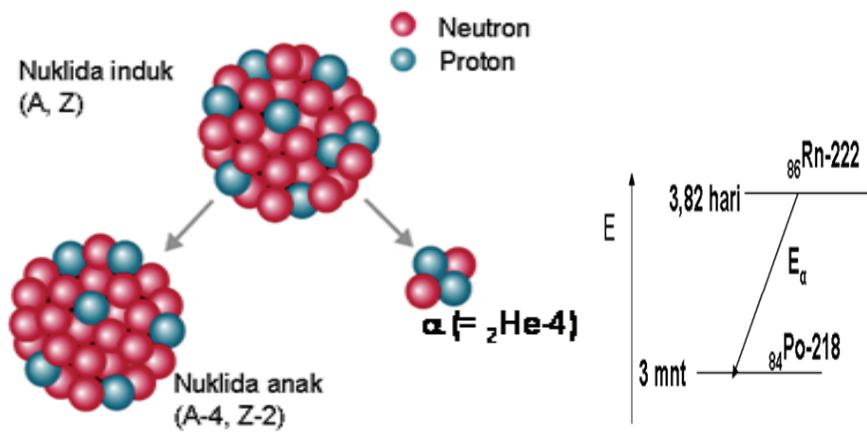
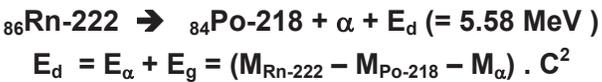
Model peluruhan α (alpha) pada umumnya menghasilkan berkas partikel α yang monoenergetik. Walaupun demikian, radiasi α dari suatu peluruhan dapat terdistribusi dalam rentang energi yang kecil apabila nuklida hasil peluruhan tidak seluruhnya langsung berada pada tingkat energi dasar (*ground state*), melainkan ada sebagian pada tingkat energi eksitasi dan kemudian diikuti dengan transformasi energi ke tingkat dasar dengan memancarkan radiasi γ .

Energi peluruhan E_d memenuhi persamaan berikut :

$$E_d = E_\alpha + E_g = (M_1 - M_2 - M_\alpha) \cdot C^2$$

- dengan E_α : energi kinetik partikel α yang dipancarkan
- E_g : energi tingkat dasar nuklida hasil peluruhan
- M_1 : massa radionuklida yang meluruh
- M_2 : massa nuklida hasil peluruhan
- M_α : massa partikel α
- C : kecepatan cahaya

Hampir semua peluruhan α terjadi pada radionuklida dengan A lebih besar dari 140. Radionuklida ${}_{52}\text{Te}$ (A antara 106 – 110) merupakan radionuklida pemancar α yang paling kecil nomor massanya. Penjelasan sederhana untuk hal ini adalah karena jumlah proton yang tinggi di dalam inti atom berat tersebut memberikan gaya tolak Coulomb yang tidak dapat diatasi oleh gaya-gaya lainnya yang ada pada inti atom. Peluruhan α dapat dianggap sebagai satu jenis peluruhan cluster, yaitu peluruhan yang menghasilkan lebih dari satu macam nuklida anak dengan perbedaan massa yang relatif besar. Dalam hal peluruhan α ini, radionuklida induk berubah menjadi partikel α yang identik dengan nuklida atom He dan nuklida lainnya dengan massa sebesar massa radionuklida induk dikurangi dengan 4 satuan massa inti. Pada Gambar III.1 ditunjukkan peluruhan α dari ${}_{86}\text{Rn-222}$ yang reaksi peluruhannya seperti berikut :



Gambar III.1. Peluruhan α dari Rn-222 menjadi Po-218.

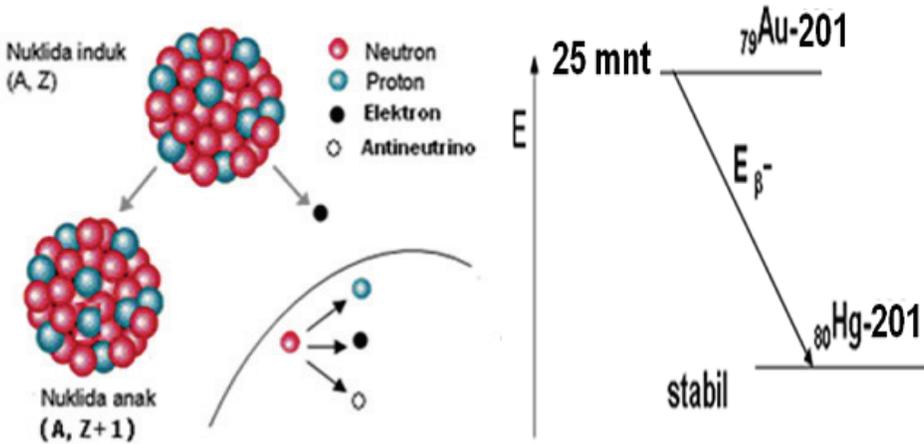
Arah radiasi nuklir digambarkan ke kiri karena jumlah proton nuklida anak ($Z=84$) lebih kecil dari proton nuklida induknya ($Z=86$). Radionuklida induk ${}_{86}\text{Rn-222}$ meluruh dengan waktu paruh 3,82 hari, sedangkan nuklida anaknya, ${}_{84}\text{Po-218}$, adalah radionuklida dengan waktu paruh 3 menit.

Peluruhan α mengakibatkan penurunan perbandingan jumlah proton terhadap jumlah neutron dan ini memberikan kestabilan inti hasil peluruhan lebih stabil dari radionuklida induknya karena efek gaya tolak Coulomb antar proton menjadi lebih kecil. Di sisi lain partikel α yang dilepaskan membawa energi kinetik yang jauh lebih besar dari nuklida hasil peluruhan karena massa partikel α jauh lebih kecil dibandingkan dengan massa nuklida hasil peluruhan.

III.3. Peluruhan Beta

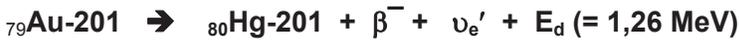
Peluruhan β menghasilkan nuklida baru yang mempunyai nomor massa sama dengan radionuklida awalnya (merupakan isobar radionuklida awalnya) karena memancarkan radiasi atau partikel β yang massanya dapat diabaikan. Ada 3 tipe peluruhan β , yaitu peluruhan negatron (memancarkan β^-), peluruhan positron (memancarkan β^+) dan penangkapan elektron orbital.

Peluruhan negatron terjadi ketika radionuklida dengan $n/p > 1$ meluruh melalui transformasi nukleon dari neutron menjadi proton disertai dengan pemancaran negatron sehingga nomor atom nuklida anak lebih besar 1 unit dari radionuklida induknya. Emisi negatron ini disertai pula dengan pemancaran suatu partikel elementer yang tidak bermassa dan tidak bermuatan tetapi mempunyai harga spin $+1/2$, yang dinamakan antineutrino (dinotasikan dengan ν_e'). Partikel antineutrino ini bukan merupakan partikel pembentuk inti atom, tidak terdapat di dalam inti atom, tetapi terjadi secara instan pada saat peluruhan negatron. Keberadaan partikel antineutrino menjadi penting ketika diperlukan penjelasan hukum-hukum kekekalan di dalam fenomena peluruhan β^- . Pada Gambar III.2 ditunjukkan skema peluruhan β^- dari radionuklida ${}_{79}\text{Au-201}$ menjadi nuklida stabil ${}_{80}\text{Hg-201}$. Arah pelepasan radiasi β^- digambarkan ke arah kanan karena jumlah proton nuklida anak lebih besar dari jumlah proton nuklida induknya.



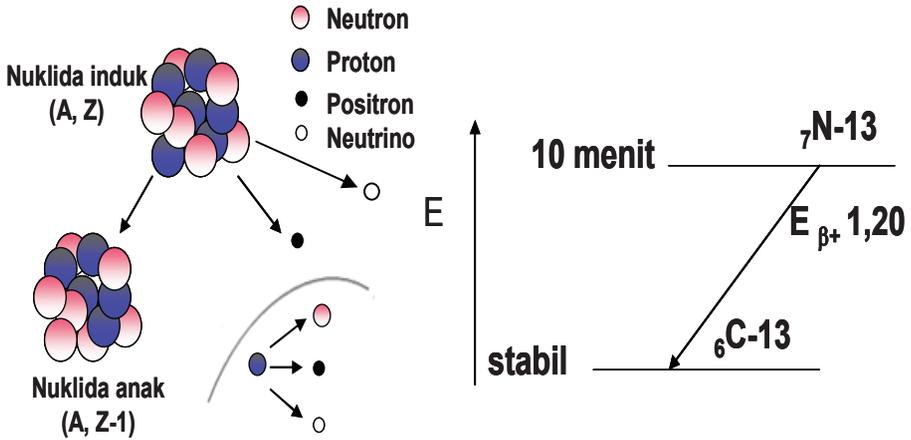
Gambar III.2. Peluruhan β^- dari ${}_{79}\text{Au}-201$ menjadi nuklida stabil ${}_{80}\text{Hg}-201$.

Persamaan reaksi peluruhan dan energi peluruhan (E_d) sama dengan energi radiasi β^- dinyatakan sebagai berikut :



$$E_d = E_{\beta^-} = (M_{\text{Au}} - M_{\text{Hg}}) \cdot C^2$$

Peluruhan positron terjadi ketika radionuklida dengan $n/p < 1$ meluruh melalui transisi nukleon dari proton menjadi neutron dengan memancarkan positron (mengubah proton menjadi neutron dan positron) sehingga nomor atom nuklida anak berkurang 1 unit dibandingkan dengan radionuklida induknya. Emisi positron (yang merupakan anti partikel dari negatron) disertai dengan pemancaran partikel elementer yang merupakan anti partikel dari antineutrino yaitu neutrino (dinotasikan dengan ν_e). Sebagai contoh, pada Gambar III.3 ditunjukkan skema peluruhan β^+ dari radionuklida ${}_{7}\text{N}-13$ menjadi nuklida stabil ${}_{6}\text{C}-13$. Pada peluruhan β^+ ini arah radiasi β^+ digambarkan ke arah kiri karena nomor atom nuklida anak hasil peluruhan lebih kecil dari nomor atom radionuklida induknya.



Gambar III.3. Peluruhan β^+ dari ${}^7\text{N-13}$ menjadi nuklida stabil ${}^6\text{C-13}$.

Dalam kesetimbangan total elektron terdapat pelepasan 2 satuan massa elektron pada produk peluruhan, yaitu 1 positron yang dibebaskan dan 1 elektron yang terlepas mengkompensasi pengurangan jumlah proton. Dengan demikian terjadi pembentukan pasangan (*pair production*, positron dan elektron) yang melibatkan perubahan energi setara dengan $2 \times$ massa elektron $M_e = 1,022 \text{ MeV}$. Karena itu mekanisme peluruhan pemancaran β^+ hanya dapat terjadi bila energi peluruhan lebih besar dari $1,022 \text{ MeV}$. Persamaan reaksi peluruhan dan energi peluruhan (E_d) adalah sebagai berikut :

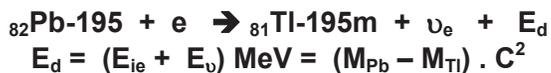
$${}^7\text{N-13} \rightarrow {}^6\text{C-13} + \beta^+ + \nu_e + E_d$$

$$E_d = (E_{\beta^+} + 2 M_e) \text{ MeV} \text{ dengan } E_{\beta^+} = (M_N - M_C - 2 M_e) \cdot C^2$$

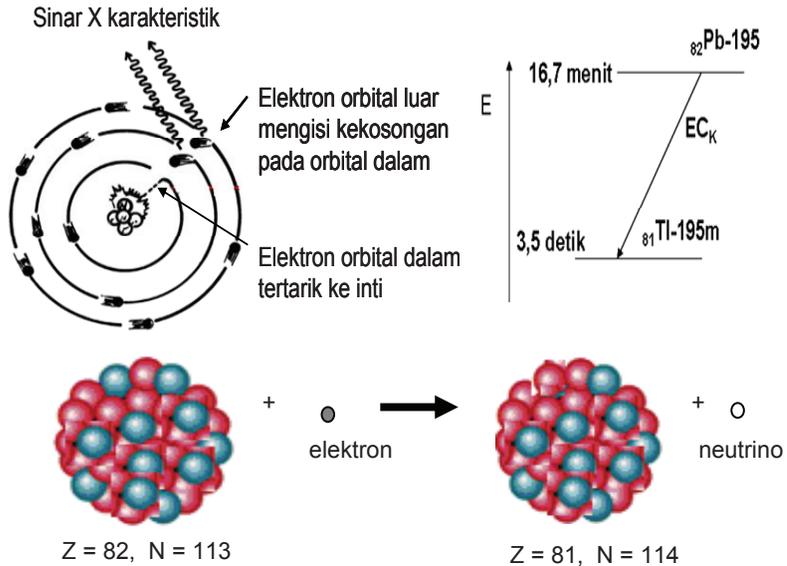
Peluruhan β melalui penangkapan elektron terjadi ketika radionuklida dengan harga $n/p < 1$ menarik sebuah elektron dari orbital dalam atom dan menetralkan sebuah proton dalam inti dengan penangkapan elektron orbital dalam tersebut. Tipe peluruhan ini disebut penangkapan elektron orbital (*orbital electron capture, EC*). Pada umumnya penarikan elektron oleh inti terjadi pada elektron kulit K (kulit atom terdekat dengan inti). Penangkapan elektron dari kulit atom yang lebih tinggi tingkat energinya (misalnya kulit L atau kulit M) jarang terjadi, akan tetapi setelah satu elektron dari kulit K tertarik ke dalam inti, terjadi kekosongan elektron pada orbital yang ditinggalkan. Kekosongan ini diisi oleh elektron dari orbital yang lebih luar dan selanjutnya secara

berturutan terjadi deeksitasi elektron yang disertai dengan pemancaran radiasi berupa sinar X yang berfluoresensi dan karakteristik (XRF, *X-ray fluorescence*). Apabila sinar X ini masih mempunyai energi yang cukup besar maka ketika menumbuk elektron orbital luar dapat saja membuat elektron tersebut terpelanting dan terlepas dari atom dengan energi kinetik yang ekuivalen dengan selisih energi sinar X dan energi ionisasi atau energi ikat elektron tersebut. Elektron yang terpelanting ini disebut sebagai elektron Auger. Fenomena penangkapan elektron pada radionuklida nomor atom tinggi dapat menghasilkan pelepasan beberapa elektron Auger, karena itu produk peluruhan penangkapan elektron orbital sering kali berada dalam bentuk tingkat oksidasi yang tinggi (sebagai ion positif tinggi).

Elektron yang tertarik oleh inti menetralkan satu proton dan mengubahnya menjadi neutron sehingga nuklida anak yang dihasilkan mempunyai nomor atom satu unit lebih rendah dari radionuklida induknya, tetapi nomor massanya tidak berubah. Pada Gambar III.4 ditunjukkan contoh fenomena penangkapan elektron orbital, yaitu pada peluruhan radionuklida $^{82}\text{Pb-195}$ (waktu paruh 16,7 menit) menjadi nuklida $^{81}\text{Tl-195m}$ (metastabil) yang masih radioaktif dengan waktu paruh 3,5 detik. Seperti halnya pada fenomena pemancaran β^+ , fenomena penangkapan elektron disertai pula dengan pelepasan partikel elementer neutrino, dan karena nuklida anak mempunyai nomor atom yang lebih kecil dari radionuklida induknya maka arah peluruhan (penangkapan elektron K) digambarkan ke arah kiri. Kekekalan energi dinyatakan dengan distribusi energi peluruhan E_d yang ekuivalen dengan jumlah energi ikat elektron K (E_{ie}) dan energi kinetik neutrino (E_ν).



Radionuklida yang lebih ringan dari isotop stabilnya cenderung meluruh melalui mekanisme penangkapan elektron (pada contoh di atas radionuklida Pb-195 lebih ringan dari isotop stabilnya, yaitu Pb-204/206/207/208), sedangkan radionuklida yang lebih berat dari isotop stabilnya cenderung meluruh melalui mekanisme pemancaran β^- (pada contoh sebelumnya radionuklida Au-201 lebih berat dari isotop stabilnya, yaitu Au-197).



Gambar III.4. Penangkapan elektron orbital K pada radionuklida $^{82}\text{Pb-195}$ menjadi $^{81}\text{TI-195m}$.

Di sisi lain, fenomena penangkapan elektron ini kompetitif dengan fenomena pemancaran positron (β^+). Pada radionuklida dengan $Z > 83$ peluruhan dengan penangkapan elektron lebih dominan dengan energi peluruhan (E_d) $< 1,022$ MeV, karena pengaruh ketidakstabilan akibat gaya tolak elektrostatik proton-proton yang jumlahnya besar. Sebaliknya pada radionuklida dengan nomor atom yang rendah, efek gaya tolak elektrostatik antar proton tidak terlalu besar pengaruhnya, karena jumlah proton yang tidak banyak, sehingga energi peluruhan dapat lebih besar dari $1,022$ MeV, dan fenomena pemancaran positron menjadi lebih dominan.

Perbandingan intensitas fenomena pemancaran β^+ dan fenomena penangkapan elektron merupakan suatu karakteristik spesifik dari radionuklida pemancar β^+ . Perbandingan ini mempunyai harga antara 0 (100 % penangkapan elektron) sampai tak berhingga (100 % pemancaran β^+). Pada Tabel III.2 ditunjukkan beberapa contoh radionuklida yang meluruh melalui pemancaran β^+ dan/atau penangkapan elektron orbital berikut intensitas masing-masing mekanisme peluruhan untuk radionuklida yang meluruh dengan kedua mekanisme tersebut.

Tabel III.2. Beberapa radionuklida yang meluruh melalui pemancaran positron (β^+) dan/atau penangkapan elektron orbital (EC).

RADIONUKLIDA	TIPE PELURUHAN	WAKTU PARUH	NUKLIDA ANAK
$_{49}\text{In-111}$	EC (100%)	2,83 hari	$_{48}\text{Cd-111}$
$_{53}\text{I-125}$	EC (100%)	60 hari	$_{52}\text{Te-125}$
$_{8}\text{O-15}$	β^+ (100 %)	2,04 menit	$_{7}\text{N-15}$
$_{7}\text{N-13}$	β^+ (100 %)	9,96 menit	$_{6}\text{C-13}$
$_{9}\text{F-18}$	β^+ (97 %) EC (3 %)	1,83 jam	$_{8}\text{O-18}$
$_{11}\text{Na-22}$	β^+ (89,5 %) EC (10,5 %)	2,602 tahun	$_{10}\text{Ne-22}$
$_{27}\text{Co-58}$	β^+ (15 %) EC (85 %)	70,78 hari	$_{26}\text{Fe-58}$

III.4. Peluruhan Gamma

Peluruhan gamma (γ), sering disebut dengan transisi isomerik, dan konversi internal elektron (sering hanya disebut konversi internal) merupakan peluruhan dari radionuklida anak hasil peluruhan α atau peluruhan β yang berada pada tingkat energi eksitasi. Pemancaran radiasi γ dan konversi internal elektron yang terjadi tidak disertai dengan perubahan komposisi struktur inti, melainkan hanya perubahan tingkat energi dari tingkat energi tereksitasi ke tingkat energi dasar. Ada perbedaan yang mendasar antara peluruhan γ (transisi isomerik) dengan konversi internal, seperti dijelaskan berikut ini.

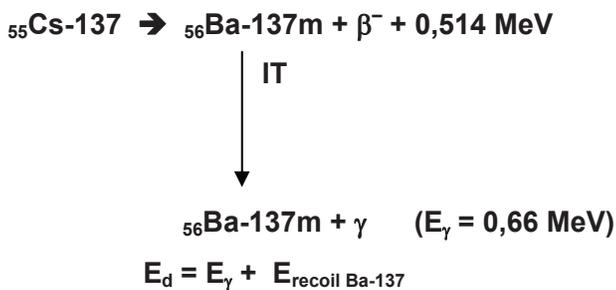
Transisi isomerik didahului oleh peluruhan α atau peluruhan β yang tidak menghasilkan nuklida anak pada tingkat energi dasar, melainkan pada keadaan tingkat energi tereksitasi yang ketika berpindah ke tingkat energi dasar (*ground state*) akan disertai dengan pemancaran radiasi γ . Apabila tingkat energi tereksitasi dapat dideteksi dengan waktu paruh yang terukur, maka tingkat energi tersebut dikatakan tingkat energi isomerik atau metastabil. Keadaan metastabil ini dinotasikan dengan huruf "m"

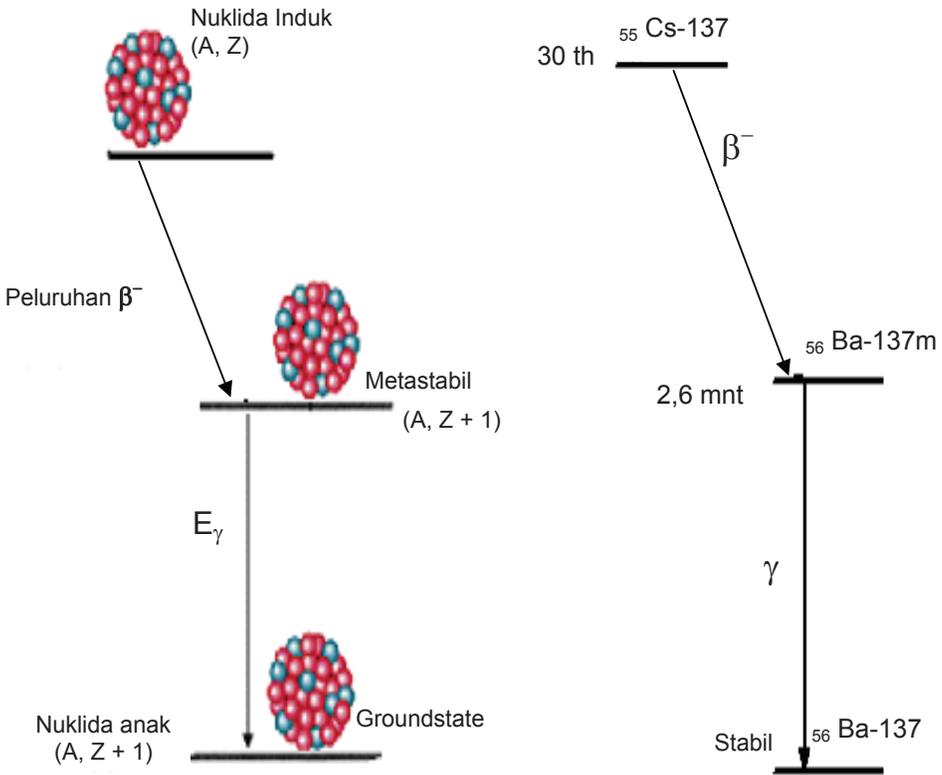
yang mengikuti nomor massa radionuklida yang bersangkutan, misalnya ^{137m}Ba ($t_{1/2} = 2,6$ menit), ^{99m}Tc ($t_{1/2} = 6$ jam), ^{108m}Ag ($t_{1/2} = 127$ tahun). Pasangan se isotop radionuklida tingkat dasar dan radionuklida metastabil disebut pasangan isomer. Transisi tingkat energi dari keadaan metastabil (tereksitasi) ke keadaan dasar (*ground state*) inilah yang disebut transisi isomerik (IT). Energi peluruhan (E_d) terdistribusi sebagai jumlah dari energi radiasi (E_γ) dan energi kinetik inti yang terbentuk (energi pelanting atau energi *recoil*, E_R).

$$E_d = E_\gamma + E_R$$

Apabila tingkat energi eksitasi tidak dapat dideteksi dengan waktu paruh yang terukur, maka secara fisik tidak terjadi spesi radionuklida metastabil. Tetapi radiasi α atau radiasi β yang lebih dari satu energi, disertai dengan adanya spektrum radiasi γ menunjukkan bahwa memang terjadi transisi tingkat energi dari tingkat energi eksitasi ke tingkat energi dasar.

Pada Gambar III.5 ditunjukkan contoh transisi isomerik, yaitu dari $^{56}\text{Ba-137m}$ menjadi isotop keadaan dasarnya, $^{56}\text{Ba-137}$. Arah peluruhan digambarkan tegak lurus ke bawah karena radionuklida anak mempunyai jumlah proton yang sama dengan radionuklida induknya. Radionuklida $^{56}\text{Ba-137m}$ sendiri dihasilkan dari peluruhan β^- radionuklida $^{55}\text{Cs-137}$.

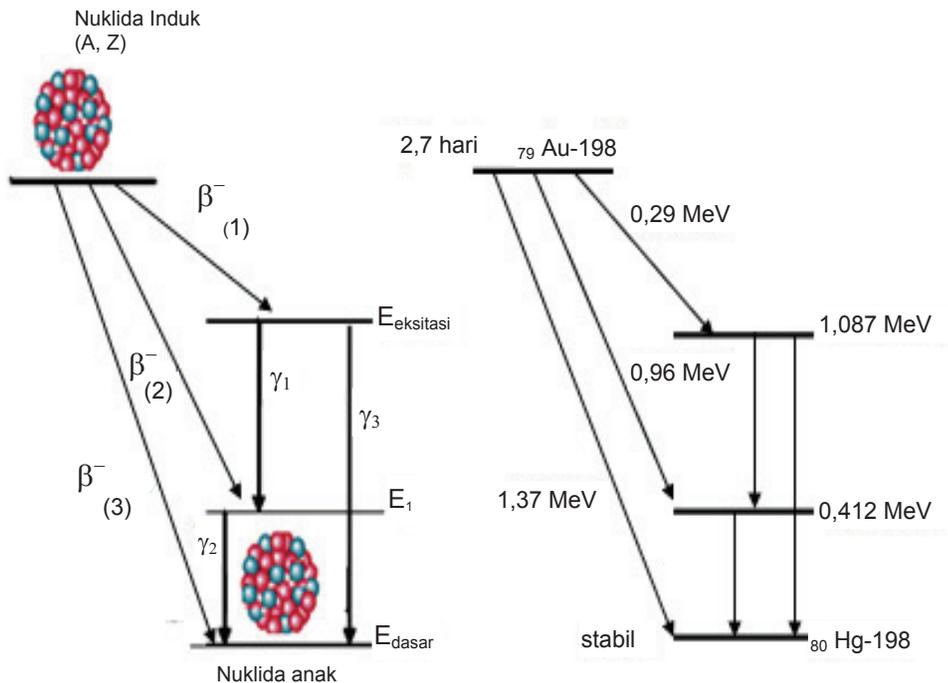




Gambar III.5. Tipe peluruhan transisi isomerik $^{56}\text{Ba-137m}$ menjadi $^{56}\text{Ba-137}$.

Sering kali transisi tingkat energi ini tidak terjadi secara langsung dari tingkat energi eksitasi ke tingkat energi dasar, tetapi melalui beberapa tahapan tingkat energi antara (*intermediate excited states*). Semakin banyak puncak spektrum radiasi γ berarti semakin banyak pula tingkat energi yang merupakan *intermediate excited states* tersebut. Pada Gambar III.6 ditunjukkan diagram energi peluruhan pada fenomena yang diuraikan di atas dengan mengambil contoh peluruhan radionuklida $^{79}\text{Au-198}$ menjadi $^{80}\text{Hg-198}$ yang disertai dengan pemancaran 3 macam radiasi β^- dan 3 macam radiasi γ .

Kebanyakan peluruhan γ dari keadaan tingkat energi eksitasi ke tingkat energi dasar berawal dari peluruhan α atau peluruhan β . Tetapi suatu bentuk metastabil tidak selalu langsung berubah hanya menjadi isotop tingkat dasarnya.



Gambar III.6. Diagram peluruhan ${}_{79}\text{Au-198}$ menjadi ${}_{80}\text{Hg-198}$.

Sebagai contoh, pengamatan pada peluruhan radioisomer ${}_{38}\text{Sr-87m}$ ($t_{1/2} = 2,8$ jam) menunjukkan bahwa radionuklida tersebut sebagian meluruh melalui mekanisme transisi isomerik menjadi ${}_{38}\text{Sr-87}$, sebagian lainnya meluruh melalui mekanisme penangkapan elektron orbital menjadi ${}_{37}\text{Rb-87}$ yang merupakan radionuklida pemancar β^- dan meluruh menjadi ${}_{38}\text{Sr-87}$ dengan waktu paruh $5,7 \times 10^{10}$ tahun.

Pada konversi internal elektron, energi internal dalam nuklida radioaktif (= energi eksitasi inti radioaktif) berinteraksi dengan elektron orbital sehingga terjadi perpindahan energi dari nuklida ke elektron orbital tersebut (biasanya elektron pada orbital yang paling dekat dengan inti). Fenomena seperti ini dapat juga dipandang sebagai peristiwa fungsi gelombang elektron orbital dalam yang berpenetrasi ke dalam nuklida sehingga terjadi perpindahan energi eksitasi nuklida ke elektron orbital dalam tersebut, tanpa didahului oleh adanya pelepasan radiasi γ . Interaksi nuklida tereksitasi dengan elektron orbital dalam tersebut mengakibatkan elektron terlepas dari orbitalnya dan terpelanting keluar dari atom. Walaupun elektron yang terpelanting ini mempunyai energi yang tinggi, tidak dapat dipandang sebagai partikel negatron sebab elektron tersebut

berasal dari orbital atom dan tidak berasal dari inti atom. Karena tidak terjadi pemancaran radiasi β^- , maka konversi internal tidak mengakibatkan perubahan nomor atom, spektrum radiasi yang dihasilkan adalah spektrum elektron yang diskret, bukan spektrum radiasi β^- yang kontinyu. Juga berbeda dengan peluruhan β^- , dalam konvensi internal tidak terjadi pembebasan partikel neutrino. Distribusi perpindahan energi dalam fenomena konversi internal elektron dinyatakan sebagai :

$$E_d = E_{eks} = E_{ie} + EK_e + E_{rna}$$

dengan

E_d = energi peluruhan

E_{eks} = energi tingkat eksitasi

E_{ie} = energi ikat elektron orbital

EK_e = energi kinetik elektron yang terpelanting

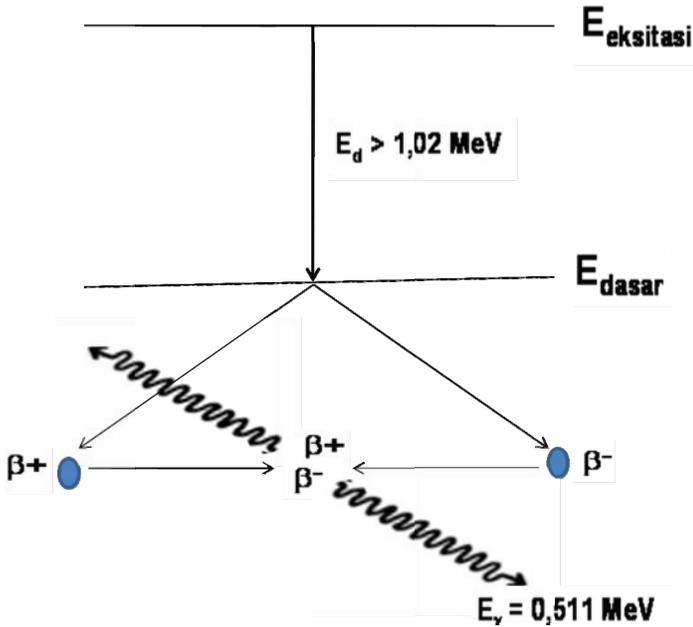
E_{rna} = energi pelanting nuklida anak.

Energi pelanting nuklida anak (E_{rna}) biasanya sangat kecil dibandingkan dengan energi kinetik elektron yang terlepas (EK_e) sehingga sering diabaikan dan tidak dituliskan dalam persamaan. Di sisi lain, pemelantingan elektron dalam peristiwa konversi internal mengakibatkan kekosongan pada orbital yang ditinggalkan, dan terjadi pengisian elektron dari orbital yang lebih luar disertai dengan pelepasan sinar X karakteristik yang bila energinya cukup besar akan berlanjut dengan pelepasan elektron Auger .

Fenomena konversi internal elektron berkompetisi dengan transisi isomerik. Kuantisasi dari kompetisi ini dinyatakan dengan besaran koefisien konversi internal (α_K) yang didefinisikan sebagai perbandingan intensitas atau laju konversi internal (IC_K) terhadap intensitas atau laju transisi isomerik (IT).

$$(\alpha_K) = (IC_K) / (IT)$$

Indeks K pada besaran (α) dan (IC) menunjukkan pemberlakuan untuk elektron orbital kulit K. Konversi internal yang melibatkan elektron orbital pada kulit yang lebih luar (misalnya kulit L atau kulit M) lebih jarang terjadi. Pada umumnya harga koefisien konversi internal cenderung lebih tinggi dengan semakin besarnya nomor atom (jumlah proton) dalam nuklida induk.



Gambar III.7. Fenomena pembentukan pasangan pada deeksitasi nuklida radioaktif.

Fenomena pembentukan pasangan seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar II.10, dapat terjadi bila energi eksitasi lebih besar dari 1,022 MeV. Dalam hal ini, radionuklida tereksitasi akan terdeeksitasi ke tingkat energi dasar dengan menghasilkan pasangan positron dan elektron yang kemudian diikuti dengan proses anihilasi dan menghasilkan 2 kuantum radiasi γ dengan arah yang berlawanan masing-masing dengan energi sebesar 0,511 MeV seperti digambarkan pada Gambar III.7.

Kekekalan energi pada fenomena pembentukan pasangan dinyatakan sebagai kesetaraan energi eksitasi (= energi peluruhan = E_d) dengan jumlah energi radiasi anihilasi (= $2 \times 0,511 \text{ MeV}$) ditambah dengan energi kinetik β^+ ($E_{K_{\beta^+}}$) dan energi kinetik β^- ($E_{K_{\beta^-}}$).

$$E_d = (1,022 + E_{K_{\beta^+}} + E_{K_{\beta^-}}) \text{ MeV}$$

III.5. Peluruhan Beruntun dan Peluruhan Bercabang

Bila suatu radionuklida induk A meluruh menjadi radionuklida anak B, yang meluruh lebih lanjut menjadi C, maka dikatakan terjadi peluruhan beruntun. Apabila C juga radioaktif maka peluruhan akan beruntun terus hingga menjadi nuklida stabil. Pada sistem peluruhan $A \rightarrow B \rightarrow C$, A merupakan radionuklida induk dari B, B merupakan radionuklida anak dari A dan radionuklida induk dari C, sedang C sendiri merupakan radionuklida anak dari B

Laju peluruhan radionuklida induk A ialah:

$$-dN_A/dt = \lambda_A \cdot N_A$$

(Tanda negatif di ruas kiri menunjukkan bahwa jumlah nuklida A berkurang karena peluruhan).

Laju pertumbuhan radionuklida anak B ialah:

$$dN_B/dt = \lambda_A \cdot N_A - \lambda_B \cdot N_B$$

(Nuklida B bertambah dari peluruhan A tapi berkurang karena peluruhan sendiri).

Penyelesaian matematis kedua persamaan di atas akan menghasilkan hubungan berikut :

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A(0)} (e^{-\lambda_A \cdot t} - e^{-\lambda_B \cdot t}) + N_{B(0)} \cdot e^{-\lambda_B \cdot t}$$

pertumbuhan B karena peluruhan
A dikurangi peluruhan B

peluruhan B
yang sejak t=0 sudah
ada

Bila pada $t = 0$ hanya ada radionuklida A, maka $N_{B(0)} = 0$, sehingga jumlah radionuklida B pada saat t ($= N_{B(t)}$) adalah ::

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A(0)} (e^{-\lambda_A \cdot t} - e^{-\lambda_B \cdot t})$$

Persamaan terakhir di atas mempunyai 2 kemungkinan keadaan, yaitu :

1. Bila $t_{1/2(A)} > t_{1/2(B)}$ sehingga $\lambda_A < \lambda_B$.

Pada t yang cukup panjang persamaan menjadi :

$$N_{B(t)} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A(0)} e^{-\lambda_A \cdot t}$$

$$\frac{N_{B(t)}}{N_{A(t)}} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \quad \text{(Persamaan kesetimbangan transien)}$$

Keadaan yang dinyatakan pada persamaan kesetimbangan transien adalah keadaan kesetimbangan radioaktif dengan perbandingan jumlah radionuklida induk A dan jumlah radionuklida anak B adalah tetap. Karena hubungan matematis keradioaktifan $A = \lambda \cdot N$ maka persamaan kesetimbangan transien dapat juga dinyatakan sebagai :

$$\lambda_A N_{A(t)} = \lambda_B N_{B(t)} - \lambda_A N_{B(t)}$$

$$\text{atau :} \quad A_{A(t)} = A_{B(t)} - \lambda_A \cdot N_{B(t)}$$

Dari persamaan terakhir di atas terlihat bahwa pada keadaan kesetimbangan transien tersebut keradioaktifan radionuklida anak lebih besar dari keradioaktifan radionuklida induknya. Akan tetapi bila radionuklida induk meluruh melalui lebih dari satu macam mekanisme peluruhan (disebut peluruhan bercabang), maka pada kesetimbangan transien keradioaktifan radionuklida anak dapat lebih kecil dari radionuklida induknya.

Keadaan khusus pada kesetimbangan transien adalah bila $\lambda_A \ll \lambda_B$ (waktu paruh nuklida induk jauh lebih besar dari waktu paruh nuklida anak). Dalam hal khusus ini maka $(\lambda_B - \lambda_A) = \lambda_B$ sehingga persamaan kesetimbangan transien menjadi :

$$\frac{N_{B(t)}}{N_{A(t)}} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} \quad \text{atau} \quad \lambda_A \cdot N_A = \lambda_B \cdot N_B$$

Persamaan di atas disebut persamaan kesetimbangan sekuler yaitu suatu kesetimbangan radioaktif dengan jumlah radionuklida induk dan

radionuklida anak berbanding terbalik dengan nilai tetapan peluruhannya, atau tercapai keadaan keradioaktifan radionuklida induk sama dengan keradioaktifan radionuklida anak.

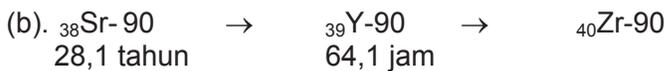
2. Bila $t_{1/2(A)} < t_{1/2(B)}$ sehingga $\lambda_A > \lambda_B$.

Pada keadaan ini, radionuklida induk meluruh lebih cepat dari radionuklida anaknya. Jenis peluruhan yang seperti ini tidak dapat menghasilkan suatu kesetimbangan radioaktif, yang berarti bahwa tidak dapat tercapai keadaan kesetimbangan antara radionuklida induk dan radionuklida anak. Radionuklida induk habis meluruh lebih dahulu, menyisakan radionuklida anaknya.

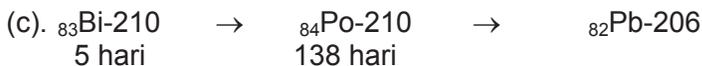
Berikut ini diberikan beberapa contoh peluruhan beruntun yang masing-masing menghasilkan kesetimbangan transien, kesetimbangan sekuler dan tidak ada kesetimbangan radioaktif.



Menghasilkan kesetimbangan transien antara ${}_{42}\text{Mo-99}$ dan ${}_{43}\text{Tc-99m}$.

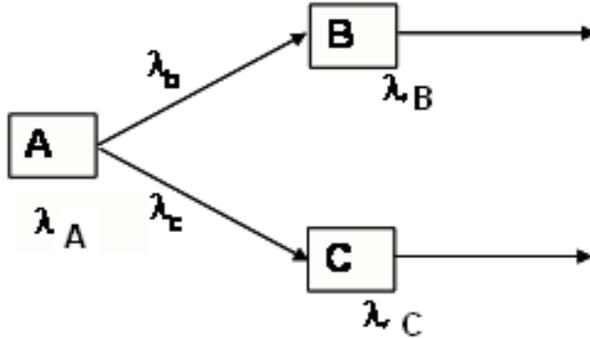


Menghasilkan kesetimbangan sekuler antara ${}_{38}\text{Sr-90}$ dan ${}_{39}\text{Y-90}$.



Tidak menghasilkan kesetimbangan radioaktif antara ${}_{83}\text{Bi-210}$ dan ${}_{84}\text{Po-210}$.

Beberapa radioisotop mengalami peluruhan dengan lebih dari satu macam mekanisme peluruhan sehingga dihasilkan lebih dari satu macam radionuklida anak. Peluruhan seperti ini disebut peluruhan bercabang. Komposisi masing-masing peluruhan adalah tetap, dinyatakan dengan tetapan peluruhan untuk masing-masing cabang peluruhan. Pada Gambar III.8 ditunjukkan fenomena peluruhan bercabang dengan dua macam radionuklida anak.



Gambar III.8. Skematik peluruhan bercabang.

Dari Gambar III.8 diperoleh hubungan yang berikut ini :

- (1). $\lambda_A = \lambda_b + \lambda_c = f_b \cdot \lambda_A + f_c \cdot \lambda_A$ dengan f adalah fraksi peluruhan cabang yang menghasilkan radionuklida anak yang tertentu.
- (2). Laju peluruhan A = $-(dN_A / dt) = \lambda_A \cdot N_A = (\lambda_b + \lambda_c) \cdot N_A$, tanda negatif menunjukkan bahwa keradioaktifan A berkurang karena peluruhan
- (3). Laju peluruhan B = $(dN_B / dt) = \lambda_b \cdot N_A - \lambda_B \cdot N_B$, keradioaktifan B bertambah karena peluruhan N_A dan berkurang karena peluruhan N_B .
- (4). Laju peluruhan C = $(dN_C / dt) = \lambda_c \cdot N_A - \lambda_C \cdot N_C$, keradioaktifan C bertambah karena peluruhan N_A dan berkurang karena peluruhan N_C .

Dari persamaan laju peluruhan A dihasilkan persamaan peluruhan untuk A yaitu :

$$(5) \quad N_A = N_{A(0)} \cdot e^{-(\lambda_b + \lambda_c)t}$$

Substitusi persamaan (5) ke dalam persamaan laju peluruhan B, persamaan (3), akan menghasilkan :

$$(6) \quad \frac{dN_B}{dt} + \lambda_B N_B - \lambda_b N_{A(0)} e^{-(\lambda_b + \lambda_c)t} = 0$$

Penyelesaian persamaan (6) dan dengan mengingat persamaan (1), $\lambda_A = \lambda_b + \lambda_c$, serta memasukkan harga $N_B = 0$ pada saat $t = 0$, akan menghasilkan nilai N_B pada waktu t :

$$(7) \quad N_B(t) = \frac{\lambda_b}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A(0)} \left[e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t} \right]$$

Dengan cara perhitungan yang sama dapat dihasilkan nilai N_C pada waktu t :

$$(8) \quad N_C(t) = \frac{\lambda_c}{\lambda_C - \lambda_A} N_{A(0)} \left[e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_C t} \right]$$

Dengan demikian dapat dipahami bahwa untuk menghitung keradioaktifan radionuklida induk pada waktu tertentu, tidak ada ketergantungan terhadap nilai fraksi peluruhan cabang. Nilai fraksi peluruhan cabang hanya mempengaruhi keradioaktifan dari masing-masing radionuklida anak.