

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

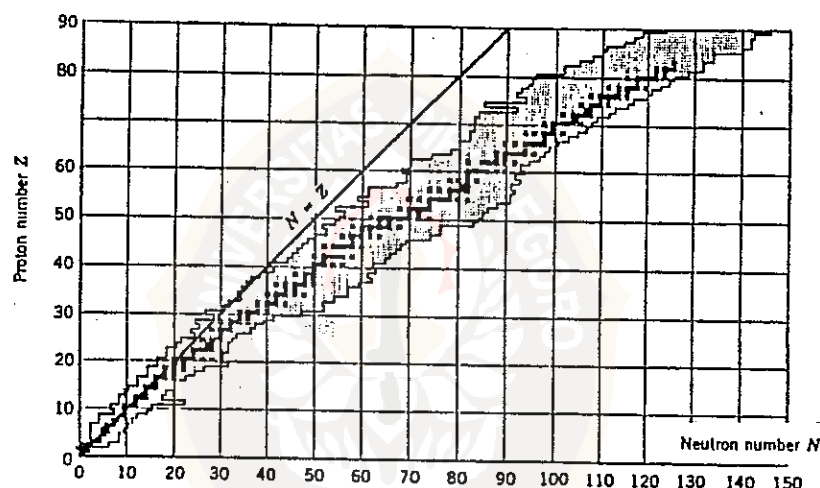
II.1. RADIOAKTIVITAS

Radioaktivitas merupakan peristiwa meluruhnya inti atom yang tidak stabil untuk memperoleh konfigurasi baru yang lebih stabil secara beruntun, sehingga diperoleh konfigurasi paling stabil pada akhir proses peluruhan. Proses ini akan disertai pemancaran gelombang elektromagnet dengan energi tinggi atau penarikan elektron pada kulit atom untuk memperoleh keadaan dengan jumlah proton dan neutron yang paling stabil.

Ketidakstabilan inti atom ini disebabkan adanya jumlah proton dan neutron yang tidak seimbang, terutama untuk inti atom dengan nomor masa rendah seperti ditunjukkan dalam gambar (2-1). Ini dapat terjadi karena didalam atom terdapat proton yang bermuatan positif yang menurut Coulomb akan selalu tolak - menolak antara proton tersebut. Untuk mempertahankan supaya tidak terpisah, maka diperlukan gaya yang lebih besar dari gaya Coulomb ini. Gaya tolak listrik pada permukaan inti atom yang memberikan energi potensial 100 Mev. Maka untuk dapat mempertahankan muatan positif ini dalam atom, gaya inti harus memberikan jumlah energi lebih besar dari 100 Mev untuk mengikat proton. (KRANE, 1992)

Dalam gambar (2-1) menunjukkan bahwa isotop - isotop stabil terletak dalam daerah yang relatif sempit. Ini

menunjukkan bahwa perbandingan proton terhadap neutron harus berada dalam batas - batas tertentu dalam suatu inti atom yang stabil. Sebagian besar inti radioaktif berada diluar daerah stabilitas inti. Grafik dalam gambar (2-1) tersebut juga memperlihatkan kemiringan daerah (slope) yang bermula dari nilai satu, secara bertahap meningkat bersama naiknya jumlah nomor atom, yang dengan ini memperlihatkan perbandingan neutron terhadap proton yang naik secara kontinyu.



Gambar (2-1): hubungan jumlah proton dan neutron untuk kestabilan inti- atom (yang tercetak tebal merupakan inti stabil)(KRANE, 1988)

Karena semua gaya inti merupakan gaya tarik, maka mengherankan jika mendapatkan inti - inti yang tak stabil dengan jumlah neutron yang berlebihan. Menurut asas eksklusi Pauli, nukleon - nukleon yang sama bisa dikelompokkan dalam pasangan - pasangan, yang masing -

masing pasang memiliki semua bilangan kuantum yang sama, kecuali bilangan kuantum putar. Karena inti - inti yang tingkat energinya telah terisi penuh bersifat lebih stabil dari pada inti yang memiliki tingkat energi yang belum terisi, maka neutron - neutron tambahan sehubungan dengan tingkat proton yang tak terisi, namun tingkat neutronnya telah terisi akan menghasilkan inti - inti yang tak stabil. Untuk mencapai kondisi stabil, inti tersebut akan mengadakan penyusunan internal kembali, dimana neutron tambahan tersebut mentransformasikan dirinya menjadi sesuai dengan reaksi inti :



Proton yang baru tersebut kemudian bubar berpasangan dengan suatu proton dalam satu tingkat proton yang tak terisi. Sebagai contoh dari mekanisme yang mungkin pada P dengan nomor masa 31 dan nomor atom 15 yang merupakan inti stabil secara alamiah. Menurut model kulit (shell), kelimabelas proton yang terdapat didalam inti didistribusikan didalam diantara beberapa pasangan bersisa satu, sementara neutron -neutron akan berpasangan menjadi delapan kelompok. Sekarang jika suatu neutron ditambahkan ke inti tersebut untuk membentuk ${}_{15}^{32}\text{P}$, sehingga akan menjadikan inti yang tidak stabil. Maka neutron tersebut memungkinkan menjadi sebuah proton dan elektron, sesuai dengan reaksi dibawah ini :



Atom ${}_{16}\text{S}^{32}$ merupakan hasil peluruhan ${}_{15}\text{P}^{32}$ yang stabil dan merupakan hasil transformasi radioaktif.

Sebenarnya terdapat persamaan antara struktur atom dan struktur inti atom, yang memudahkan kita melengkapi berbagai sifat inti atom. Perilaku inti atom ini berlaku hukum - hukum fisika kuantum, yang memiliki keadaan dasar dan eksitasi serta memancarkan foton, sewaktu melakukan transisi antara berbagai keadaan eksitasi. Seperti halnya keadaan atom, keadaan inti atom juga ditandai dengan momentum sudut totalnya.

Sedangkan keadaan utama antara kajian struktur atom dan struktur inti atom. Dalam fisika atom, elektron merasakan gaya yang ditimbulkan inti, tanpa dipengaruhi gaya luar, tetapi partikel - partikel inti bergerak kesana kemari dibawah pengaruh gaya yang ditimbulkan penyusun inti sendiri. Interaksi timbal balik antara elektron memang mempengaruhi skema tingkat energi atom, tetapi kecil sekali pengaruhnya. Dalam fisika inti interaksi timbal balik antara partikel penyusunnya yang memberikan gaya inti, sehingga kita tidak boleh memperlakukan persoalan benda banyak ini sebagai gangguan yang berarti.

II.1.1. Radioaktivitas Alam

Radioaktivitas alam pertama kali ditemukan oleh Henry Becquerel secara kebetulan pada tahun 1896. Ketika ia

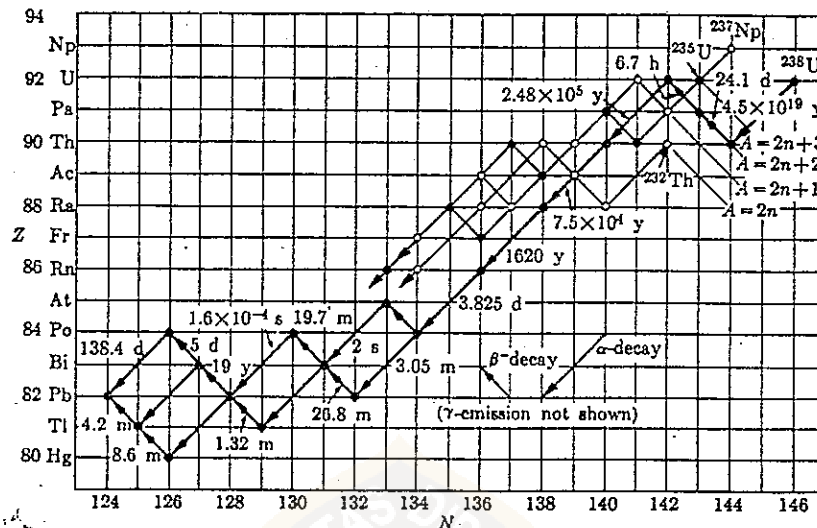
meninggalkan senyawa yang berisi uranium pada sebuah papan fotografi. Setelah ditinggalkan papan menunjukkan gambar yang berasal dari kristal uranium.

Dalam radionuklida alam peluruhan dengan pemancaran sinar α dan β sangat sering terjadi, hal ini disebabkan untuk α dan β pada peluruhan diperlukan tingkat energi yang memungkinkan untuk tingkat energi yang diperlukan untuk meluruh oleh radionuklida alam. Dalam peluruhan α nomer masa berubah 4 unit, sedangkan dalam pemancaran β nomer masa tidak berubah, tetapi Z dan N berubah satu unit. dengan demikian menunjukkan bahwa peluruhan β membuat perubahan pada nukleon penyusun inti, tetapi tidak merubah nomer masa A . Dan peluruhan α merubah susunan nukleon dalam inti, dengan perubahan nomer masa $A-4$.

Untuk radioaktif alam yang dapat dikelompokkan menjadi empat deret; yaitu dengan nomer masa $A = 4n, A = 4n+1, A = 4n+2, A = 4n+3$, dengan n adalah bilangan asli. Untuk peluruhan radioaktif alam dengan nomer masa $A = 4n+2$ (Radium - Uranium) ditunjukkan pada gambar (2-2) dibawah ini. Dalam gambar dapat dilihat peluruhan yang berkesinambungan dari unsur yang satu menjadi unsur yang lain hingga stabil pada Pb^{206} .

Untuk inti induk yaitu U^{238} mempunyai waktu paruh $4,5 \cdot 10^9$ tahun, ini merupakan waktu yang sangat lama sekali sedangkan untuk matahari sendiri dibentuk sekitar $3 \cdot 10^9$ tahun yang lalu. Jadi diperkirakan pada saat pembentukan sistem matahari U^{238} sudah ada. (ENGE.1972)

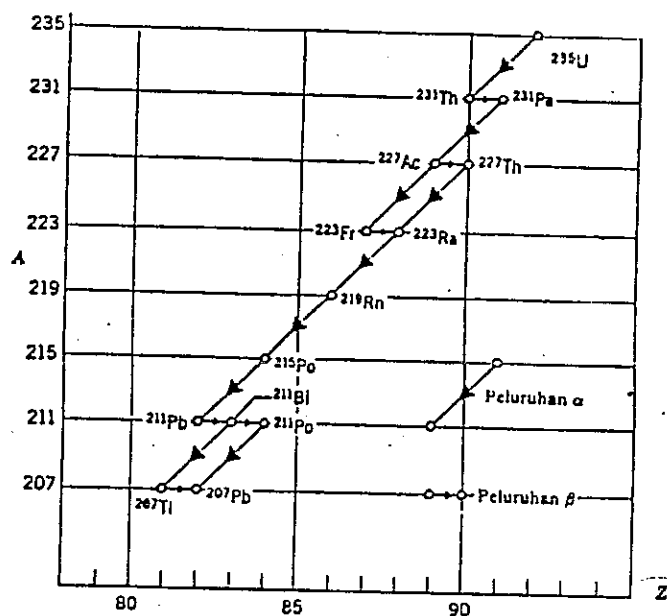
Untuk peluruhan radioaktif alam dengan nomor masa $A = 4n+3$ ditunjukkan dalam gambar (2-3) yang bermula dari inti induk ^{235}U sampai menjadi inti stabil ^{207}Pb .



Gambar (2-2): Peluruhan atom radioaktif Uranium - ^{238}U sampai menjadi stabil pada inti ^{206}Pb (ENGE H A, 1971)

Selain beberapa unsur radioaktif yang termasuk dalam empat deret diatas ada beberapa yang tidak termasuk dan ada di bumi yang ditunjukkan pada tabel dibalik halaman ini beserta waktu paruhnya.

Beberapa unsur radioaktivitas lain yang dihasilkan secara kontinyu dalam atmosfer bumi sehingga hasil reaksi inti antara molekul udara dengan partikel berenergi tinggi yang dikenal sebagai sinar kosmis. Yang paling dikenal dan bermanfaat dari hasil reaksi ini adalah ^{14}C yang mengalami peluruhan sinar β dengan waktu paruh 5730 tahun.



Gambar (2-3): Peluruhan inti atom Uranium - 235 (KRANE, 1992)

ISOTOP	$T_{\frac{1}{2}}$ (Th)
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$
^{87}Rb	$4,8 \cdot 10^{10}$
^{92}Nb	$3,2 \cdot 10^7$
^{113}Cd	$9,0 \cdot 10^{15}$
^{115}In	$5,1 \cdot 10^{11}$
^{138}La	$1,1 \cdot 10^{11}$
^{176}Lu	$3,6 \cdot 10^{10}$
^{187}Re	$4,0 \cdot 10^{10}$

Tabel (2-1): Beberapa isotop radioaktif alam dan waktu paruhnya (KRANE, 1992)

II.1.2. Hukum Peluruhan Radioaktif.

Atom yang mempunyai nomor masa yang sangat besar dari radionuklida, yang jenisnya sama dan dianggap

bahwa peluruhan inti prosesnya sama, apakah dengan emisi α , β , atau γ . Proses ini adalah proses statistik, berarti bahwa suatu saat inti meluruh, hal itu tidak dapat terulang lagi. Dapat diartikan bahwa atom pada waktu t dan N inti mula - mula sebelum meluruh. Jumlah peluruhan selama interval waktu dari t ke $t+dt$ harus sebanding dengan dt . Atau dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$-dN = \lambda \cdot N \cdot dt \quad (II.3)$$

Koefisien kesebandingan λ disebut konstanta peluruhan dan ditulis sebagai :

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \quad (II.4)$$

Konstanta peluruhan sama untuk fraksi inti dalam sampel yang diberikan adalah peluruhan persatuan waktu. Dengan mengintegrasikan persamaan (II.3),

$$\begin{aligned} \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= \int_0^t -\lambda dt \\ \ln N - \ln N_0 &= -\lambda t \\ \frac{N}{N_0} &= e^{-\lambda t} \\ N &= N_0 e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (II.5)$$

N adalah jumlah total inti radioaktif pada waktu t . Dengan

derivatif persamaan (II.3) kita dapatkan :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = -\left(\frac{dN}{dt}\right)_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{dN}{dt}\right)_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{II.6})$$

Waktu paruh inti radioaktif ($t_{1/2}$) dinyatakan selama jumlah inti berubah dalam satu waktu paruh menjadi setengahnya dari harga sebelumnya. Dengan menggunakan persamaan (II.5) kita ambil

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ sehingga dihasilkan}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (\text{II.7})$$

Konstanta peluruhan λ , dan umur rata - rata dari inti radioaktif dengan umur :

$$\tau = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} t(-dN) = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{II.8})$$

Dari persamaan (II.5) dan (II.6) terlihat bahwa waktu hidup dan paruh dibedakan dengan faktor $\ln 2 = 0,693$.

Jika konstanta peluruhan λ , dengan sendirinya bersama bentuk peluruhan dan energi peluruhan, membuat ciri khas yang diberikan oleh inti radioaktif dan dapat dipandang sebagai tanda yang membedakan dengan radionuklida

lainnya.

II.1.3. Hukum – hukum Kekekalan Dalam Peluruhan Radioaktif

Tiap peluruhan radioaktif alam maupun buatan dan reaksi inti menunjukkan, bahwa peluruhan atau reaksi inti tidak terjadi sembarangan dalam mencapai atau membentuk inti baru dan partikel yang dihasilkan. Untuk setiap reaksi inti dan peluruhan inti selalu berlaku beberapa hukum tertentu yang membatasi hasil yang mungkin terjadi. Hukum – hukum ini kita sebut hukum kekekalan yang memberikan pegangan penting terhadap perilaku dasar alam. Beberapa hukum kekekalan yang diterapkan pada proses peluruhan adalah :

1. Hukum Kekekalan Energi.

Merupakan hal yang paling penting bagi semua hukum kekekalan yang berlaku. Hukum ini memberitahu kita mengenai peluruhan mana yang paling mungkin terjadi dan kemungkinan untuk menghitung energi diam atau energi kinetik dari hasil peluruhan. Sebagai contoh, sebuah inti X hanya dapat meluruh menjadi inti X' yang lebih ringan. Selain itu terjadi pemancaran satu atau lebih partikel secara bersama kita sebut x. Jika masa diam X lebih besar dari masa total X' + x, Kelebihan energi dari pengurangan masa ini disebut Q peluruhan.

$$m(X) c^2 = m(X') c^2 + m(x) c^2 + Q$$

$$Q = [m_n(X) - m_n(X') - m_n(x)] c^2 \quad (\text{II.9})$$

m_n adalah masa diam inti (nukleus).

Ini menunjukkan bahwa peluruhan dapat terjadi, jika Q bernilai positif. Kelebihan energi Q ini muncul sebagai energi kinetik partikel - partikel hasil peluruhan (dengan anggapan X mula - mula diam), sehingga

$$Q = k_{X'} + k_x \quad (\text{II.10})$$

$k_{X'}$ = energi kinetik X' .

k_x = energi kinetik x .

2. Kekekalan Momentum Linier.

Jika inti yang meluruh yang mulanya diam, maka momentum total semua partikel hasil peluruhannya harus nol.

$$P_{X'} + P_x = 0 \quad (\text{II.11})$$

Pada umumnya reaksi inti atau peluruhan inti atom, masa partikel x yang dipancarkan lebih kecil dari masa inti sisa X' , sehingga momentum partikel $P_{X'}$, menghasilkan energi kinetik $k_{X'}$ yang kecil.

3 Kekekalan Momentum Sudut.

Ada dua jenis momentum sudut, yaitu momentum sudut spin s dan momentum sudut gerak atau orbital l . Dalam kerangka diam dari inti X , momentum sudut sebelum terjadi

peluruhan S_X . Setelah terjadi peluruhan, pada inti X' mempunyai sejumlah spin dan partikel - partikel x , dan juga sejumlah momentum sudut $l = r \times p$ dari x dan X' , yang bergerak relatif terhadap titik dalam ruang yang semula ditempati inti X . Dengan demikian hukum ini menyatakan bahwa :

$$S_X = S_{X'} + S_x + l_{X'} + l_x \quad (II.12)$$

Spin intrinsik S adalah sifat partikel atom inti. Bahwa elektron mempunyai spin $S = 1/2$, dan inti - inti juga mempunyai spin, yang berasal dari proton dan neutron penyusunnya. Spin intrinsik sebuah atom memiliki sebuah nilai yang dapat berupa kelipatan bulat atau setengah pecahan dari $\hbar$, bergantung apakah A genap atau ganjil. Momentum sudut l selalu terkuantisasi dalam kelipatan bulat dari $\hbar$.

4. Kekekalan Muatan Listrik.

Hukum ini merupakan bagian mendasar dalam seluruh proses peluruhan dan reaksi. Hukum ini menyatakan bahwa muatan listrik total sebelum dan sesudah peluruhan adalah konstan.

5. Kekekalan nomor masa.

Dalam beberapa proses peluruhan dapat diciptakan beberapa partikel, seperti foton, elektron, neutron dan

sebagainya yang tidak ada sebelum terjadi peluruhan. Hal ini dapat terjadi jika energi awal lebih besar dari pada energi partikel yang dihasilkan dan energi inti hasil. Untuk menciptakan elektron misalnya nilainya adalah 0,511 Mev, tetapi alam tidak akan memperkenankan kita memusnahkan atau menciptakan proton dan neutron. Dengan demikian berlaku jumlah nomer masa tidak berubah dalam proses peluruhan atau reaksi. Dalam beberapa proses peluruhan, A tetap tidak berubah, karena baik Z maupun N berubah sedemikian rupa, sehingga mempertahankan jumlah keduanya tetap.

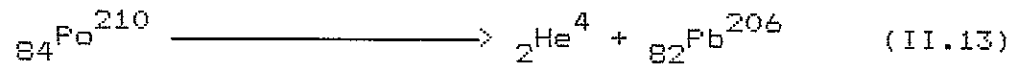
II.2. PARTIKEL ALFA

II.2.1. Peluruhan Alfa (α).

Pemancaran radiasi α merupakan efek dari penolakan Coulomb, dan berat inti merupakan faktor utama adanya gaya tolak Coulomb, karena semakin luas permukaan inti semakin besar gaya tolak Coulombnya. Sedangkan luas permukaan inti sebanding dengan nomer masa A, sehingga dari pernyataan diatas memberikan suatu kenyataan bahwa peluruhan α hanya terjadi pada inti bernomer masa besar.

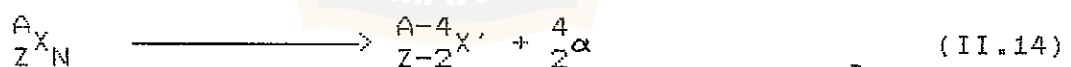
Partikel α merupakan inti helium yang berenergi sangat tinggi yang dipancarkan dari inti radioaktif pada saat rasio neutron terhadap proton terlalu rendah pada inti yang berat. Partikel ini merupakan inti yang kuat dan bermuatan positif yang terdiri dari dua proton dan dua neutron. Menurut hukum kekekalan nomer masa untuk

pemancaran α pada $^{210}_{84}\text{Po}$ adalah sebagai berikut



Dalam contoh ini Po - 210 rasio neutron terhadap proton adalah 126 terhadap 84, atau 1,5 terhadap 1. Setelah terjadi perubahan dengan memancarkan α , maka terbentuk suatu unsur baru dengan inti yang stabil, yakni $^{206}_{82}\text{Pb}$ yang memiliki rasio 1,51 : 1.

Peluruhan ini merupakan proses spontan yang dapat diartikan bahwa energi muncul secara tiba - tiba dalam sistim tanpa sebab yang jelas. Energi ada dari pengurangan masa sistim, oleh karena partikel α sangat stabil dan memiliki bentuk struktur yang kuat, serta memiliki perbandingan masa yang relatif kecil dengan masa yang hilang. Pemancaran yang spontan dari partikel α dapat digambarkan oleh proses sebagai berikut :



Rutherford menunjukkan bahwa partikel α adalah inti helium yang tersusun dari dua proton dan dua neutron. Dan proses peluruhan ini harus sesuai dengan hukum kekekalan energi. Sebelum terjadi peluruhan inti induk X pada saat diam. Energi awal dari sistim adalah energi diam dari inti X, yaitu $m_X c^2$. Pada state terakhir terbentuk X' dan α ,

keduanya dalam keadaan bergerak. Memiliki energi total :

$$mX'C^2 + TX' + m\alpha C^2 + T\alpha \quad (II.15)$$

dimana T menunjukkan energi kinetik dari partikel hasil.

Menurut hukum kekekalan energi adalah :

$$\begin{aligned} mXC^2 &= mX'C^2 + TX' + m\alpha C^2 + T\alpha \\ (mX - mX' - m\alpha)C^2 &= TX' + T\alpha \end{aligned} \quad (II.16)$$

Pada sisi sebelah kiri dari persamaan diatas adalah besarnya energi yang dibebaskan dalam peluruhan, disebut Q, dengan $C^2 = 931,502 \text{ Mev/u}$, untuk menghitung Q adalah :

$$Q = (mX - mX' - m\alpha)C^2 \quad (II.17)$$

Dalam peluruhan akan terjadi secara spontan, jika $Q > 0$. Harga Q ini juga sama dengan energi kinetik total yang diberikan pada peluruhan partikel α .

$$Q = TX' + T\alpha \quad (II.18)$$

Jika inti mula - mula X dalam keadaan diam. Dengan gerakan atom X' dan α dalam arah yang berlawanan dengan menghasilkan momentum akhir nol sesuai dengan persamaan :

$$P\alpha = PX' \quad (II.19)$$

Peluruhan α dapat terjadi jika membebaskan energi sekitar 5 Mev. Energi ini untuk X' dan α , sehingga $T \ll mc^2$. Menurut kinematika non relativistik ditulis untuk energi kinetik $T = \frac{p^2}{2m}$ dan dari persamaan (II.18) dan (II.19) diperoleh :

$$T_{\alpha} = \frac{Q}{(1 + m_{\alpha}/m_{X'})} \quad (\text{II.20})$$

(KRANE, 1987)

Karena rasio masa kecil atau $m_{\alpha} \ll m_{X'}$, maka hal ini menunjukkan bahwa X' merupakan sebuah inti berat. Ini cukup akurat jika memunculkan rasio sebesar $4/A-4$, dimana $A \gg 4$, sehingga energi kinetik α menjadi :

$$T_{\alpha} = Q(1 - 4/A) \quad (\text{II.21})$$

(KRANE, 1987)

Partikel α akan memiliki energi kinetik dari Q sekitar 98%, sedangkan untuk inti berat X' akan memiliki sisanya yaitu 2%. Energi kinetik X' merupakan energi "recoil" yang arahnya berlawanan dengan energi kinetik α . Jadi bila suatu peluruhan α mempunyai harga Q adalah 5 Mev, Inti X' akan memiliki energi kinetik setingkat 100 kev. (KRANE, 1987)

II.2.2. Sistematika Peluruhan α .

Salah satu yang menandai peluruhan α dan menjadi pembicaraan sepanjang tahun 1911 yang lalu, saat Rutherford

menemukan inti. Geiger dan Nutal mengemukakan bahwa pemancaran α dengan energi desintegrasi besar memiliki waktu paruh yang pendek, serta bila energi desintegrasi kecil waktu paruhnya panjang. Contohnya pada ^{232}Th memiliki waktu paruh $1,4 \cdot 10^{10}$ tahun dengan $Q = 4,08$ Mev, dan ^{218}Th memiliki waktu paruh $1,0 \cdot 10^{-7}$ detik dengan $Q = 9,85$ Mev. Dengan faktor 2 dalam energi potensial yang memberikan faktor 10^{24} dalam waktu paruh. Keterangan secara teori dari Geiger - Nutal pada tahun 1928 merupakan penemuan baru dalam mekanika kuantum.

Garis grafik dari $\log t_{1/2}$ dengan Q , yang mencakup seluruh peluruhan α , sebagai salah satu pertimbangan hamburan oleh Geiger - Nutal yang terkenal. Hasilnya kurva sangat rata, tetapi jika menggaris sendiri pemancaran α dengan Z sama dan selanjutnya memilih dari kelompok ini dengan Z dan N keduanya sama. Lihat gambar 2-4. genap - ganjil, ganjil - genap, dan ganjil - ganjil, inti secara umum, tetapi tidak menggaris kedalam kurva yang rata sekali, periodenya 2 - 1000 lebih panjang waktunya, daripada untuk bentuk genap - genap dengan Z dan Q sama.

Yang menarik dari ^{235}U (Z genap, N ganjil) salah satunya membentuk waktu hidup yang sangat panjang. Jika waktu paruh lebih pendek dari 1000 inti ini tidak akan terjadi dalam alam, dan kemungkinan tidak akan dapat dibuat reaktor nuklir pada saat ini.

Gambar 2-5 menunjukkan sistematik relatif dari pemancaran α . Dapat dilihat dari data bahwa untuk $A > 212$,

terlihat bahwa penambahan neutron ke sebuah inti akan mengurangi energi desintegrasi, sehingga menurut Geiger - Nuttal waktu paruhnya bertambah lama, dengan kata lain inti akan lebih stabil. Peluruhan yang tidak berkelanjutan mendekati $A = 212$ terjadi pada $N = 126$ dan contoh lain struktur shell.

Dapat dibandingkan sistematika yang tergantung dari Q dan A dengan perkiraan masa seempiris rumus, sesuai persamaan :

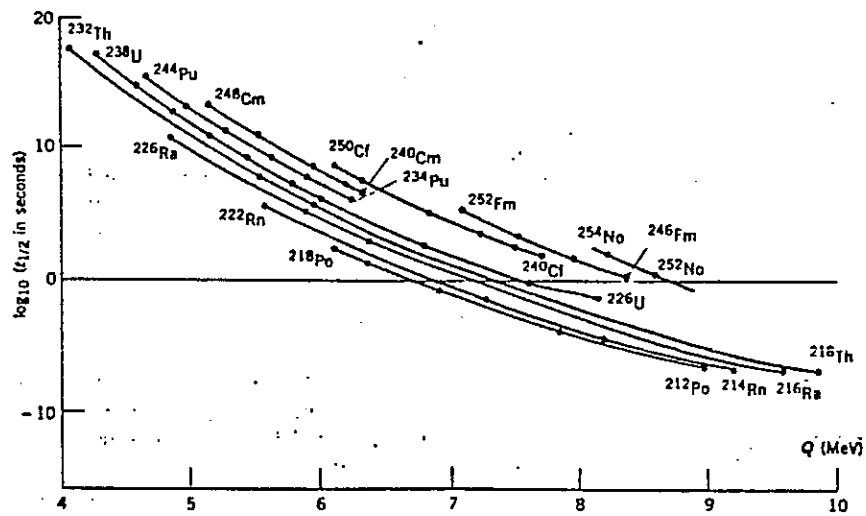
$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta \quad (\text{II.22})$$

$$Q = B(^4\text{He}) + B(Z-2, A-4) - B(Z, A) \quad (\text{II.23})$$

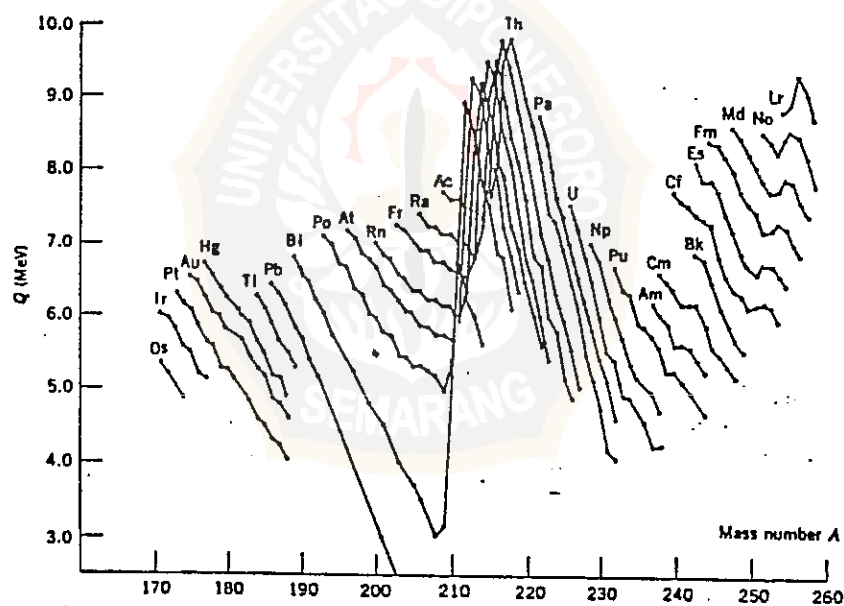
$$= 28,3 - 4a_v + \frac{4}{3}a_s A^{-1/3} + 4a_c \frac{Z}{A^{1/3}}(1 - Z/3A) - 4a_{\text{sym}}(1 - 2Z/A)^2 + 3a_p A^{-7/4} \quad (\text{II.24})$$

(KRANE, 1987)

Pendekatan dari persamaan (II.24) adalah $Z, A \gg 1$. Untuk ^{226}Th , rumus ini memberikan $Q = 6,75$ Mev. Hasilnya tidak terlalu jauh dari hasil pengukuran yaitu 6,45 Mev. Sedangkan untuk ^{232}Th pada gambar 2-5 dan dari persamaan (II.24) diperoleh $Q = 5,71$ Mev (dibandingkan dengan $Q = 4,08$ Mev). Juga untuk ^{220}Th rumus memberikan $Q = 7,77$ Mev. (dibandingkan dengan $Q = 8,95$ Mev). Dari hasil ini



Gambar (2-4): menunjukkan hubungan waktu paruh dan energi peluruhan atau disebut (Geiger - Nutal rule) untuk Z genap dan N genap (KRANE, 1987)



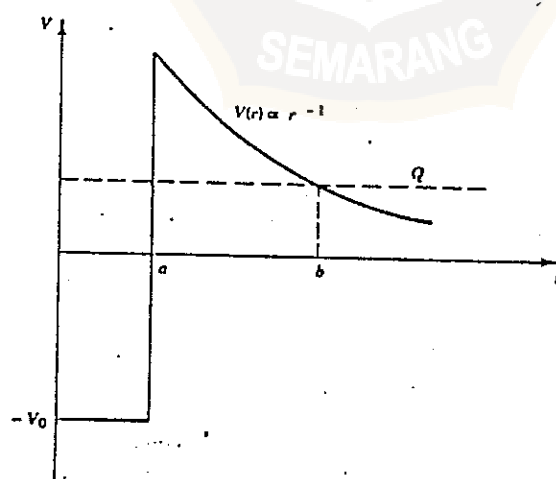
Gambar (2-5): Energi yang dibebaskan dalam peluruhan α terhadap variasi berat inti (KRANE, 1987)

menyatakan bahwa parameter - parameter rumus seempiris masa dipilih untuk memberikan secara kasar harga peluruhan Q dan ini membuktikan kebenaran $Q > 0$ untuk inti berat. Selain

itu membuktikan bahwa perkiraan Q berkurang dengan penambahan A berturut - turut seperti isotop Thorium, walaupun memberikan perubahan kecil Q terhadap perubahan A . (rumus memberikan $\delta Q = 0,17$ Mev perunit perubahan dalam A . Dalam penelitian rata - rata perubahan adalah $\delta Q = 0,40$ Mev perunit perubahan dalam A). (KRANE, 1987).

II.2.3. Teori Pemancaran α

Pada tahun 1928 oleh Gamow, Garney dan Condon, dalam teorinya sebuah partikel α dimisalkan bergerak dalam daerah bola, bola ini adalah inti. Dan menandakan bahwa partikel α bekerja didalam inti induk. Lihat gambar 2-6 di bawah ini, yang menunjukkan sebuah garis grafik yang sesuai dengan teori energi potensial antara partikel α dan inti hasil dengan variasi jarak dengan pusat inti, garis horisontal Q adalah energi desintegrasi. Potensial Coulomb berada pada jari - jari akan terlihat terpotong oleh Q .



Gambar (2-6): potensial inti atom atau potensial Coulomb (barrier) dalam satu dimensi (KRANE, 1987)

Jari - jari a dapat diambil seperti jumlah jari - jari inti hasil dan jari - jari partikel α . Disini ada tiga daerah penting. Dalam $r < a$ berada dalam inti yang potensial Coulombnya $-V_0$, V_0 adalah harga positif dari proton, secara klasik partikel α dapat bergerak dalam daerah ini dengan energi kinetik $Q + V_0$, tetapi partikel ini tidak dapat lolos keluar inti. Daerah batas shell $a < r < b$, membentuk potensial barrier, menyebabkan potensial lebih besar dari total energi yang dapat digunakan Q . Secara klasik partikel α tidak dapat masuk daerah ini secara langsung. Daerah $r > b$ adalah daerah diluar inti.

Partikel α yang ada dalam potensial barrier selalu bergerak dan akan memantul secara tajam jika menumbuk potensial barrier. Gerakan ini setiap saat mencoba untuk meloloskan dan keluar dari daerah $r = a$ menembus potensial barrier. Untuk kenyataannya partikel α dalam inti yang tidak stabil tidak meluruh dengan segera. Peluruhan akan diawali dengan gerakan yang berulang - ulang, sehingga akhirnya menembus. Seperti dalam ^{238}U , kemungkinan untuk dapat menembus barrier adalah kecil, sehingga partikel α mencoba untuk meloloskan diri sebanyak 10^{38} kali, sebelum terpancar keluar (10^{21} perdetik selama 10^9 tahun).

Konstanta dari peluruhan atau pemancaran α adalah dalam satu sisi :

$$\lambda = f \cdot P \quad (\text{II.25})$$

f adalah frekwensi dari partikel α yang ada dalam potensial barrier, dan P adalah kemungkinan transmisi menembus barrier. Persamaan (II.25) adalah perlakuan dalam semi klasik untuk $r < a$. Harga f secara kasar sederajat dengan v/a , dan v kecepatan relatif partikel α yang mementalkan dalam inti. Sedangkan v didapat dari energi kinetik α untuk $r < a$. Dari perkiraan potensial barrier $V_0 = 35 \text{ Mev}$ memberikan $Q = 5 \text{ Mev}$, jika $f = 6 \cdot 10^{21}/s$.

Tinggi barrier memungkinkan P harus dicapai supaya dapat menembus barrier. Perhitungan kemungkinan besarnya P sesuai dengan rumus (untuk satu dimensi) bentuk barrier persegi panjang untuk $V_0 > Q$.

$$P = e^{-2K_2 a} \quad (\text{II.26})$$

(Enge, 1972)

Didasar dari barrier satu dimensi berbentuk persegi panjang, sehingga P akan bergantung tinggi dan lebar barrier (tinggi V_0 dan lebar segiempat). kelebihan energi E dari partikel, barrier Coulomb pada gambar 2-6 mempunyai tinggi B pada $r=a$, besarnya :

$$B = \frac{1}{4\pi \epsilon} \frac{z \cdot Z' e^2}{a} \quad (\text{II.27})$$

(KRANE, 1987)

Dalam reaksi ini partikel α mempunyai muatan ze , dan inti yang melengkapi penolakan Coulomb mempunyai muatan $Z'e =$

$(Z-z)e$. Tinggi barrier bervariasi terhadap $(B-Q)$ diatas energi potensial pada $r=a$ dan nol pada $r=b$. dapat juga diambil energi rata - rata adalah $\frac{1}{2}(B-Q)$ dan rata - rata lebarnya $\frac{1}{2}(b-a)$, maka faktor k dari persamaan (II.26) menjadi :

$$\sqrt{\frac{(2m)}{h^2} \frac{1}{2}(B-Q)}$$

Untuk membentuk inti berat ($Z=90$, $a=7,5$ fm) lebar barrier B mendekati 24 Mev, juga untuk faktor k_2 mendekati $1,6 \text{ fm}^{-1}$. Untuk jari - jari b saat partikel α sudah lepas dari barrier dicari dengan persamaan energi partikel dan energi potensial, yaitu :

$$b = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{zZ'e^2}{Q} \quad (\text{II.27})$$

(KRANE, 1987)

Sedangkan untuk sebuah inti berat dengan $Q=6$ Mev, $b=42$ fm, dengan $k_2 \frac{1}{2}(b-a) \gg 1$ maka persamaan (II.26) dapat didekati :

$$P = e^{-2k_2(1/2)(b-a)}$$

(KRANE, 1987)

Untuk kejadian dalam perkiraan $P = 2 \cdot 10^{-25}$ dan $\lambda = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ dan $t_{1/2} = 700$ s. Perbedaan sedikit dari Q untuk 5 Mev merubah P pada $1 \cdot 10^{-30}$ dan $t_{1/2} = 10^8$ s. Ini adalah perhitungan yang belum teliti untuk dapat menerangkan beberapa perubahan $t_{1/2}$ antara $Q = 5$ Mev dan $Q = 6$ Mev

seperti digambarkan dalam gambar 2-4.

Perhitungan mekanika kuantum secara eksak adalah sama dalam perhitungan secara kasar seperti diatas. Jika barrier Coulomb $V(r) = \frac{zZ'e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ dan lebar dr , maka kemungkinan menembus barrier kedua kecil sekali yang diperluas dari r ke $r + dr$, adalah :

$$dP = \exp \left(-2 dr \sqrt{\left(\frac{2m}{h^2}\right)(V(r) - Q)} \right) \quad (II.29)$$

Jadi kemungkinan menembus barrier :

$$P = e^{-2G}$$

G adalah faktor Gamow yang dirumuskan :

$$G = \sqrt{\frac{2m}{h^2 Q}} \int_a^b [V(r) - Q]^{1/2} dr$$

Atau dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$G = \sqrt{\frac{2m}{h^2 Q}} \frac{z Z' e^2}{4\pi \epsilon_0} \left[\arccos \sqrt{X} - \sqrt{X(1-X)} \right] \quad (II.30)$$

(KRANE, 1987)

X adalah a/b atau Q/B . Banyak harga dalam kurung dari persamaan (II.30) mendekati $\frac{\pi}{2} 2X^{1/2}$, bilamana $X \ll 1$, sedang dari perhitungan mekanika kuantum untuk waktu paruh peluruhan α dengan :

$$f = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2(V_0 + Q)}{m}}$$

$$t_{1/2} = 0,693 \frac{a}{c} \sqrt{\frac{m c^2}{2(V_0 + Q)}} \exp \left[2 \sqrt{\frac{m c^2}{(hc)^2 Q}} \frac{z Z' e}{4\pi \epsilon_0} \left(\frac{\pi}{2} - 2 \sqrt{\frac{Q}{B}} \right) \right] \quad (II.31)$$

(KRANE.1987)

Rumus dari waktu paruh ini adalah pendekatan dari yang terukur pada penelitian mengenai waktu paruh.

II.3. PARTIKEL BETA

II.3.1. Peluruhan Partikel β .

Unsur - unsur yang ada dialam beberapa telah ditemukan inti -inti tertentu yang mempunyai nomer masa sama. Juga ada yang secara alamiah membentuk isobar - isobar tetangga, contoh pasangan dari $_{50}\text{Sn}^{115}$ dan $_{49}\text{In}^{115}$, dengan Z hanya berbeda satu satuan. Dari pasangan ini salah satunya akan tidak stabil, tetapi kemungkinan mempunyai umur hidup yang panjang sekali. Untuk isobar - isobar tetangga ini mempunyai kelebihan energi yang nampak seperti isobar stabil yang dibedakan satu satuan Z dan N. Antara dua atom ini yang merupakan isobar bertetangga, salah satunya mempunyai massa atom yang lebih besar. Atom ini akan meluruh menjadi atom yang lebih ringan melalui proses peluruhan β , tetapi tidak ada kemungkinan untuk mengurangi massa inti sebanyak dua satuan.

Dalam proses peluruhan β , positron atau elektron dipancarkan dari inti atau juga elektron orbital ditangkap oleh inti. Dalam semua proses neutrino atau anti neutrino keduanya sama-sama dipancarkan yang memiliki energi relatif terhadap energi β .

Elektron dan positron merupakan partikel yang saling berlawanan muatannya, sehingga dapat meleburkan satu dengan yang lainnya sewaktu ditumbukkan pada tempat yang tertutup. Sehubungan dengan hal tersebut ada dua jenis neutrino yang terlibat dalam peluruhan β , yaitu neutrino yang dipancarkan dalam peluruhan positron dan anti neutrino pada peluruhan β . Keempatnya termasuk dalam partikel lepton.

Neutrino dan antineutrino yang dikemukakan oleh Pauli pada tahun 1931 digunakan untuk menjelaskan kehilangan energi dan momentum angular dalam proses peluruhan β . Misalnya dari peluruhan neutron bebas:



Neutron mempunyai jumlah kuantum spin $1/2$, sehingga proton sama dengan neutron tanpa antineutrino pada ruas kanan dari persamaan tersebut. Momentum angular tak dapat dikonservasikan selama momentum angular orbital dari elektron relatif terhadap proton yang mempunyai jumlah kuantum integer.

Proses peluruhan β dapat terjadi, jika tersedia energi untuk pembentukan partikel lepton, proses dasarnya

adalah:

$$n \longrightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad (\text{II.32})$$

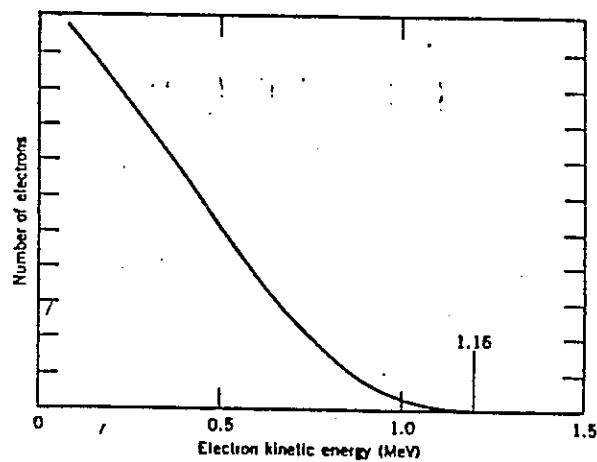
$$p \longrightarrow n + \beta^+ + \nu \quad (\text{II.33})$$

$$p + e \longrightarrow n + \nu \quad (\text{II.34})$$

Dalam proses tersebut diatas muatan dan jumlah lepton keduanya dikonservasikan. β^- digunakan untuk menggambarkan elektron yang dihasilkan oleh peluruhan β . Dan simbol e digunakan untuk elektron orbital atom. Proses (II.32) secara energetik memungkinkan untuk elektron bebas yang mempunyai $E = 0,78$ Mev dan waktu paruh 12 bulan (ENGE.1972) Proses (II.33) dan (II.34) tidak mungkin berlangsung tanpa energi tambahan yang dapat menimbulkan medan nukleon lain kedalam inti.

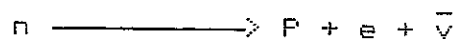
II.3.2. Energi Yang Dibebaskan Dalam Peluruhan β .

Partikel β memiliki energi berurutan dari nol sampai limit yang sama dengan perbedaan energi antara state awal dan state akhir. Pada kenyataanya partikel β dipancarkan dengan energi lebih kecil dari perbedaan energi state awal dan state akhir. Contohnya, partikel β dari Bi dipancarkan dengan energi kinetik 1,16 Mev, akan tetapi kita mendapat distribusi selanjutnya dari nol sampai 1,16 Mev. Terlihat pada gambar (2-7), yang menunjukkan energi β relatif. Dan gambar ini merupakan sifat atau karakteristik dari peluruhan elektron.



Gambar (2-7): Distribusi tenaga dari radiasi β dengan tenaga maksimum 1,16 Mev (KRANE, 1987)

Perhitungan untuk energi bebas, Pauli pada tahun 1931 mengemukakan bahwa energi ini dipancarkan sebagai proses peluruhan sebuah partikel kedua, dan oleh Fermi diberi nama neutrino. Neutrino untuk menampilkan energi peluruhan β . Pertama kita pertimbangkan peluruhan dari neutron bebas (yang terjadi dengan waktu paruh mendekati 10 menit) sesuai dengan persamaan (II.32) yaitu :



Batas harga Q adalah perbedaan antara energi masa awal dan akhir dari inti :

$$Q = (m_n - m_p - m_e - m_{\bar{\nu}}) c^2 \quad (\text{II.35})$$

dan untuk energi peluruhan neutron yang tersisa :

$$Q = T_p + T_e + T_{\bar{\nu}} \quad (\text{II.36})$$

Energi kinetik recoil proton T_p , yang besarnya sendiri 0,3 Mev. Sebuah neutrino dan elektron akan mengambil bagian energi peluruhan, yang terhitung untuk spektrum elektron. Energi maksimum elektron menjadikan energi antineutrino minimum. Dan jika antineutrino mempunyai kehilangan energi kecil, $Q = (T_e)_{\max}$. Pengukuran energi maksimum dari elektron adalah 0.782 ± 0.013 Mev. Penggunaan ukuran neutron, elektron dan proton, dapat dihitung harga Q :

$$\begin{aligned} Q &= mnc^2 - m_Pc^2 - mec^2 - m_{\bar{\nu}}c^2 \\ Q &= 939,573 \text{ Mev} - 938,280 \text{ Mev} - 0,511 \text{ Mev} - m_{\bar{\nu}}c^2 \\ Q &= 0,782 \text{ Mev} - m_{\bar{\nu}}c^2 \end{aligned}$$

Untuk pengukuran energi maksimum yang teliti (mendekati 13 kev) dipandang antineutrino mempunyai massa yang ringan. Tetapi pada kenyataannya antineutrino dan neutrino didefinisikan sama dengan nol.

Neutrino ini bergerak dengan kecepatan cahaya dan total energi relativistiknya E_r , adalah sama seperti energi kinetiknya. Untuk elektron, menggunakan keduanya energi kinetik dan total energi relativistik E_e , besarnya $E_e = T_e + m_0c^2$. Inti terecoil dengan energi rendah dan dapat diuraikan secara non relativistik. Dan proses peluruhan β

negatif dalam sebuah inti :

$${}^A_Z X_N \longrightarrow {}^A_{Z+1} X'_{N-1} + e^- + \bar{\nu} \quad (\text{II.37})$$

$$Q_{\beta} = (m_N({}^A_Z X) - m_N({}^A_{Z+1} X') - m_e)c^2$$

Dengan m_N menunjukkan massa inti. Untuk mengubah massa nuklir kedalam massa atom netral rata - rata, yang digantikan $m({}^A_Z X)$, sehingga :

$$m({}^A_Z X)c^2 = m({}^A_{Z+1} X')c^2 + Zm_e c^2 - \sum B_i \quad (\text{II.38})$$

B_i merupakan energi binding dari i elektron. dalam batas massa atom :

$$Q_{\beta}^- = \{ [m({}^A_Z X) - Zm_e] - [m({}^A_{Z+1} X') - (Z+1)m_e] - m_e \} c^2$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^Z B_i - \sum_{i=1}^{Z+1} B_i \right\} \quad (\text{II.39})$$

$$Q_{\beta}^- = [m({}^A_Z X) - m({}^A_{Z+1} X')] c^2 \quad (\text{II.40})$$

Sebagai catatan bahwa massa elektron membuat tidak berlaku kejadian ini, perbedaan dalam energi binding elektron dan neutron :

$$Q_{\beta}^- = T_e + E_{\bar{\nu}} \quad (\text{II.41})$$

Jika salah satu berharga minimum

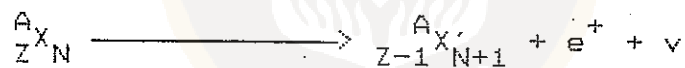
$$Q_{\beta^-} = (T_e)_{\max} = (E_{\nu^-})_{\max}$$

Dalam kejadian peluruhan $^{210}\text{Bi} \longrightarrow ^{210}\text{Po}$, tabel massa memberikan :

$$\begin{aligned} Q_{\beta^-} &= [m(^{210}\text{Bi}) - m(^{210}\text{Po})]c^2 \\ &= [209,9840954 - 209,9828484] \cdot [931,502] \text{ Mev} \\ &= 1,161 \text{ Mev} \end{aligned}$$

Gambar (2-7) menunjukkan $T_{e\max} = 1,16 \text{ Mev}$. Harga Q_{β^-} digunakan dalam keadaan untuk menentukan massa ^{210}Po , dengan massa ^{210}Bi ditentukan dari ^{210}Bi digunakan tangkapan elektron. Persamaan (II.40) digunakan dengan pengukuran Q_{β^-} untuk memperoleh $m(^A\text{X}')$.

Dalam peluruhan positron prosesnya :



Dan perhitungan yang sama untuk Q_{β^+} adalah :

$$Q_{\beta^+} = [m(^A\text{X}) - m(^A\text{X}') - 2m_e]c^2 \quad (\text{II.42})$$

Untuk tangkapan elektron :



Perhitungan dari Q harus diambil perhitungan bahwa atom X'

adalah sebuah atom yang mengeksitasi state setelah tangkapan elektron. Jika inti mengambil elektron dari kulit K karena tarikan inti. Setelah elektron tertarik tempat lowong ini akan segera terisi oleh elektron pada kulit diatasnya dengan disertai pemancaran sinar x karakteristik, satu atau lebih sinar x akan terpancar. Total energi sinar X ini sama dengan total energi binding tangkapan elektron. Dengan demikian massa atom X lebih berat dari pada atom X' dalam keadaan ground state oleh Bn. Energi binding dari tangkapan elektron kulit ke n ($n = K, L, M, \dots$) harga Q adalah

$$Q_e = [m(^A X) - m(^A X')]c^2 - B_n \quad (II.43)$$

Perbedaan energi massa atom untuk β dan tangkapan elektron adalah $2m_e c^2 = 1,022 \text{ Mev}$.

Semuanya menunjukkan untuk peluruhan antara ground state nuklir. Jika state akhir nuklir X' adalah sebuah state eksitasi, harga Q pasti sama dengan pengurangan oleh energi eksitasi dari state.

$$Q_{ex} = Q_{ground} - E_{ex} \quad (II.44)$$

(KRANE, 1987)

II.4. PENCACAHAN RADIOAKTIVITAS SANGAT RENDAH

Beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan dalam pengukuran radioaktivitas sangat rendah adalah : cacah latar belakang, efisiensi, figure of merit (FOM) dan

batas deteksi terendah (LLD) atau minimum detectable activity (MDA).

II.4.1. Cacah Latar Belakang.

Radiasi yang memberikan kontribusi besar pada cacah latar belakang adalah berasal pada radionuklida alam yang terkandung didalam bahan penahan radiasi, bahan tempat contoh, bahan penunjang, serta radiasi sumber sekelilingnya (ruangan) misalnya : bahan bangunan, udara, benda - benda pemancar radiasi dekat detektor dari sinar kosmis. Disamping itu derau listrik (noise) dari peralatan elektronik, misal kabel terlalu panjang, sambungan kabel kurang baik, ground kurang baik dan tegangan listrik yang labil.

Untuk pengukuran cacah latar belakang harus diusahakan sehingga dapat diturunkan serendah mungkin untuk saat pengukuran contoh yang beraktivitas rendah, karena akan memperbesar harga FOM. Beberapa cara yang dapat dilakukan antara lain :

- a. Komponen mekanik dan elektronik dipilih yang kualitasnya memenuhi kriteria untuk pencacahan berlatar belakang sangat rendah.
- b. Alat ukur diletakkan dalam ruang bawah tanah sebagai ruang pencacahnya.
- c. Detektor dikelilingi oleh bahan penahan radiasi yang kandungan radionuklidanya sangat rendah, biasanya dipilih timbal yang sangat tua dengan kandungan ^{210}Pb

yang rendah.

- d. Pada bagian dalam bahan penahan radiasi dilengkapi dengan lapisan tembaga (Cu), kadmium (Cd) dan akrilik.
- e. Menggunakan alat anti koensidensi.

II.4.2. Efisiensi Pencacahan.

Pencacahan berlatar belakang sangat rendah α/β dipakai untuk mengukur aktivitas contoh baik yang mengandung partikel α maupun β atau kedua-duanya. Sedangkan radiasi γ dapat pula tercacah hanya sekitar 2%. Alat ini mempunyai detektor dengan geometri 2π sehingga efisiensi pencacahan yang diperoleh kurang dari 40%. Efisiensi pencacahan dapat diperoleh dari perbandingan antara laju cacah dan laju peluruhan dari suatu sumber radioaktif yang diukur secara matematik dan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi pencacahan (E)} = \frac{Cs}{A_{st} \cdot I} \cdot 100\% \quad (\text{II.45})$$

dengan Cs menyatakan cacah contoh standar radioaktif (laju cacah total - laju cacah latar belakang). A_{st} menyatakan aktivitas sumber standar, dan I menyatakan intensitas (%). Yang dimaksud laju cacah adalah jumlah cacah yang teramati dibagi dengan waktu cacah yang digunakan selama pengukuran berlangsung, dalam hal ini digunakan satuan cacah per menit (cpm) atau (cps).

II.4.3. Figur Of Merit (FOM) dan Minimum Detaction Concentration (MDC).

Figur Of Merit adalah salah satu besaran untuk memperlihatkan kemampuan alat ukur radioaktif. Secara matematis dituliskan sebagai berikut :

$$FOM = \frac{E^2}{Cs} \quad (II.46)$$

Cs adalah laju cacah latar belakang, dan E adalah efisiensi pencacahan (%).

Batas deteksi terrendah atau Low Limit of Detection (LLD) adalah suatu besaran yang dipakai untuk menilai kemampuan suatu sistim pengukuran pada kondisi tertentu. Untuk menentukan aktivitas terendah yang dapat dideteksi dengan tingkat kepercayaan 95 % digunakan persamaan :

$$LLD = \frac{4.66 \cdot Sb}{60 \cdot I \cdot E} \quad (II.47)$$

Dan $Sb = \sqrt{\frac{Cs}{ts}}$ adalah deviasi standar (cpm). Cs adalah laju cacah latar belakang (cpm); ts waktu selama mencacah latar belakang (menit). I menyatakan intesitas (%), E adalah efisiensi. Maka batas deteksi terendah dapat dinyatakan dalam (dpm).

Pada pengukuran radioaktivitas tingkat rendah biasanya digunakan besaran konsentrasi, yaitu satuan Bq/l atau Bq/kg. Oleh karena itu persamaan (II.47) kadang - kadang diasosiasikan sebagai konsentrasi rendah yang dapat

dideteksi atau Minimum Detection Concentration (MDC), sebagai berikut :

$$MDC = \frac{4,66 \cdot Sb}{60 \cdot I \cdot E \cdot W} \quad (II.48)$$

dalam hal ini W menyatakan berat atau volume atau luas contoh. Satuan MDC adalah Bq/l, Bq/kg, Bq/m².

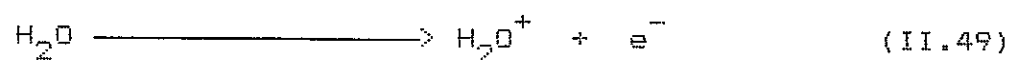
Pada pengukuran contoh lingkungan yang aktivitasnya sangat rendah dalam orde mBq diperlukan batas deteksi yang rendah. Suatu cara untuk menentukan batas deteksi yang rendah dapat dilakukan dengan waktu cacah yang panjang dan jumlah contoh yang dianalisa banyak.

Suatu alat cacah dikategorikan baik, jika alat cacah tersebut memiliki harga MDC serendah mungkin, akan tetapi memiliki harga FOM setinggi mungkin. Ini dapat dicapai jika efisiensi pencacah tinggi, laju cacah latar belakang rendah, dan waktu cacah optimum atau cukup lama.

II.5. PENGARUH RADIASI PADA TUBUH UNTUK TINGKAT RENDAH HINGGA SEDANG.

Efek - efek langsung dari radiasi dan ionisasi, serta pengaktifan tidak sifat spesifik. Mungkin terjadi disembarang tempat pada tubuh. Karena dalam zat makanan dimungkinkan langsung berada dalam molekul suatu protein, atau dalam suatu asam nukleat, maka efek - efek tertentu yang disebabkan oleh rusaknya molekul dapat dipastikan. Namun karena sebagian besar tubuh terdiri dari air,

sebagian besar tindakan langsung radiasi juga terjadi pada air. Hasil penyerapan energi oleh air membentuk radikal - radikal bebas yang bersifat sangat reaktif dalam air yang secara kimia bersifat racun dan mungkin mengeluarkan daya peracunannya terhadap molekul - molekul lainnya. Bilamana air murni mengalami iradiasi, maka akan kita dapatkan :



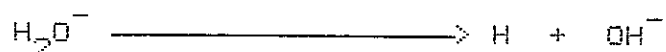
dan ion positif akan segera berdisosiasi sesuai dengan persamaan :



Sementara elektronnya akan terikat oleh suatu molekul air yang bersifat netral :

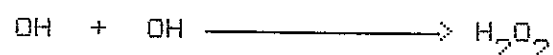


yang akan segera berdisosiasi menjadi :

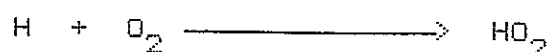


Ion - ion H^+ dan OH^- tidak memiliki konsekuensi apa - apa, karena semua cairan dalam tubuh telah mengandung konsentrasi kedua ion ini. Radikal - radikal H dan OH mungkin bergabung dengan radikal - radikal yang sejenis,

atau mungkin bereaksi dengan molekul lain dalam larutan. Kemungkinan tersebut diatas ditentukan oleh laju pemindahan energi linier yang tinggi. Radikal - radikal yang bebas OH terbentuk cukup dekat satu sama lain, sehingga memungkinkan radikal - radikal tersebut untuk bersatu sebelum bergabung dengan radikal bebas H, yang menghasilkan hidrogen peroksida.



Sementara radikal bebas H membentuk gas H_2 . Sedangkan produksi dari reaksi - reaksi persamaan (II.49) hingga (II.52) memiliki umur yang sangat pendek, kira - kira dalam mikro detik, namun hidrogen peroksida yang merupakan senyawa yang relatif stabil, mampu bertahan cukup lama untuk bereaksi menuju titik yang cukup jauh dari titik asalnya. Hidrogen peroksida merupakan pengoksidasi yang sangat kuat, dengan demikian dapat mempengaruhi molekul - molekul atau sel - sel yang tidak mengalami kerusakan akibat radiasi langsung. Jika air yang teriradiasi mengandung oksigen yang telah terurai, maka radikal bebas tersebut mungkin bergabung dengan oksigen membentuk radikal hidropersil.



Yang bersifat reaktif, dan dengan demikian memiliki umur

yang lebih lama, jika dibandingkan dengan radikal OH. Stabilitas yang lebih besar ini memungkinkan radikal hidroperoksil untuk bergabung dengan radikal hidrogen bebas untuk membentuk hidrogen peroksida. Maka akan mempertinggi daya pencemar dari radiasi. (HERMAN CEMBER, 1983) Pembentukan radikal - radikal ini terjadi pada darah, oleh karena itu akan sangat mungkin terjadi jika bahan yang terkontaminasi unsur radioaktif adalah bahan makanan yang selalu masuk kedalam darah secara berkelanjutan. Sedangkan untuk radiasi dari luar tubuh partikel α dan β tidak terlalu berbahaya bagi tubuh, terutama untuk radiasi α yang mempunyai ionisasi terhadap medium tinggi, sehingga kulit luar tubuh sudah cukup untuk menahan radiasi ini. Untuk radiasi tingkat rendah α dan β sama sekali tidak berbahaya bagi tubuh, karena memiliki energi yang harganya kecil, maka daya tembusnya semakin kecil.

