BAB 3
RADIOAKTIVITAS

Fenomena emisi radiasi dari sesuatu bahan disebut dengan radioaktivitas, bahan yang memancarkan radiasi tersebut disebut unsur radioaktif, dan radiasi yang dipancarkan disebut sinar radioaktif.

3.1 Jenis Sinar Radioaktif

Terdapat 3 macam sinar radioaktif yaitu partikel alfa, partikel beta dan sinar gamma.

(1) Partikel Alfa (α)

Partikel alfa adalah inti helium, menimbulkan ionisasi dalam gas yang dilewatinya, dan jika energi habis setelah ionisasi, dapat menangkap electron menjadi atom helium netral. Kebanyakan partikel alfa memiliki kecepatan antara 1,4 x 10^{7}ms^{-1} dan 2,2 x 10^{-7}ms^{-1}. Partikel alfa dapat menimbulkan fluoresensi untuk beberapa bahan.

(2) Partikel Beta (β)

Partikel beta adalah electron yang berasal dari inti, menimbulkan ionisasi sedikit dibandingkan partikel alfa, Partikel beta tidak dapat dihentikan oleh selembar kertas, tetapi lembaran aluminium tipis dapat menyerap sebagia besar partikel beta. Kecepatan partikel beta dapat mencapai 0,99 c. Partikel beta menghasilkan fluoresensi yang terang, warnanya tergantung dari jenis bahan yang disinarinya.

(3) Sinar Gamma (γ)

Sinar gamma adalah gelombang elektromagnetik atau foton yang berasal dari inti atom, bergerak dengan kecepatan cahaya, dengan panjang gelombang antara 1,7 x 10^{-8} m sampai 4,1 x 10^{-6} m. . Sinar gamma juga menghasilkan fluoresensi, dapat mengionisasi gas, tetapi tidak sebesar sinar alfa dan beta. Daya tembus sinar gamma 100 kali lebih besar dari daya tembus sinar beta Sinar gamma tidak dapat dihentikan oleh aluminium yang tebalnya beberapa cm, tetapi dapat diserap oleh lembaran timah hitam yang tipis.

3.2 Hukum Peluruhan Radioaktif

Bilamana inti dari suatu atom memancarkan sebuah partikel alfa, partikel beta, sebuah sinar gamma atau partikel lainnya atau bila menangkap sebuah electron dari kulit terluar sebuah atom, prosesnya disebut peluruhan radioaktif.

Jika ada N inti yang belum meluruh, sejumlah dN, akan meluruh dalam waktu dt, yang besarnya adala h

$$dN = -\lambda dtN \tag{3.1}$$

Dimana λ adalah probabilitas inti untuk meluruh, yang disebut juga sebagai konstanta peluruhan atau konstanta disintegrasi. Tanda minus menunjukkan bahwa N berkurang ketika t bertambah. Persamaan 3.1 dapat ditulis

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \tag{3.2}$$

Integrasi Persamaan 3.2 dengan asumsi bahwa ketika t = 0, jumlah atom radioaktif yang ada adalah N_0 akan menghasilkan

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \tag{3.3}$$

dimana N(t) adalah jumlah atom radioaktif yang ada pada waktu t.

Probabilitas λ, yang digunakan pada persamaan di atas disebut dengan konstanta disintegrasi atau konstanta peluruhan. Aktivitas dari suatu sampel radioaktif didefinisikan sebagai jumlah peluruhan per detik. Dari Persamaan 3.3 diperoleh aktivitas R sebagai

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \tag{3.4}$$

Dengan demikian aktifitas sutau sampel tergantung pada jumlah inti yang ada, dan konstanta peluruhan λ.

(1) Usia Paroh

Selang waktu dimana aktivitas atau inti yang belum meluruh berkurang sampai setengah harga awal disebut usia paroh, $t_{\frac{1}{2}}$. Hubungan $t_{\frac{1}{2}}$ dengan tetapan peluruhan adalah

$$\frac{N_0}{N} = N_0 e^{-\lambda t\frac{1}{2}}$$

Atau

$$t\tfrac{1}{2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} \qquad (3.5)$$

Setiap radioisotop memiliki umur paroh karakteristik, mulai dari sepersejuta detik sampai bilyun tahun.

(2) Usia Hidup Rata-Rata

Bentuk eksponensial dari peluruhan menyatakan bahwa peluruhan yang lengkap sampai semua inti meluruh, berlangsung sampai waktu tak berhingga. Karena inti meluruh secara acak, maka waktu hidup sebuah inti berharga mulai dari nol sampai tak berhingga. Untuk keperluan statistic perlu dirumuskan waktu hidup rata-rata sebuah inti τ yang diperoleh dari perhitungan jumlah usia dari semua inti dibagi dengan jumlah inti

$$\tau = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + t_3 dN_3 + \ldots.}{dN_1 + dN_2 + dN_3 + \ldots} \qquad (3.6)$$

Kita dapat menulis Persamaan 3.6 dalam bentuk integral

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t\,dN}{\int_0^{N_0} dN} = \frac{\int_0^{N_0} t\,dN}{N_0} \qquad (3.7)$$

dimana $N_0 = dN_1 + dN_2 + dN_3 + ..$

Subsitusi dN dari Persamaan 3.3 ke Persamaan 3.7 dan kemudian diintegrasi diperoleh

$$\tau = \frac{-\int_\infty^0 \lambda t N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \int_0^\infty \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \qquad (\ 3.8)$$

sehingga

$$\tau == \frac{1}{\lambda}$$

3.3 Hukum Peluruhan Berturutan

Baik dalam kasus radioaktivitas alamiah maupun buatan, peluruhan dapat terjadi secara berturutan. Suatu inti induk meluruh menjadi inti anak. Jika inti anak ini juga suatu unsur radioaktif, tentu juga akan menghasilkan inti cucu dan seterusnya. Dalam banyak kasus yang terjadi adalah inti induk meluruh menjadi inti anak, inti anak meluruh menjadi inti yang stabil. Suatu pertanyaan yang menarik adalah, jika kita mulai dengan sejumlah isotop induk radioaktif, berapa jumlah masing-masing inti untuk setiap peluruhan pada waktu tertetu.

Misalkan pada waktu t, jumlah inti induk N_1, meluruh dengan tetapan peluruhan λ_1, menjadi inti anak. Misalkan N2 adalah jumlah inti anak yang meluruh dengan tetapan peluruhan λ_2 menjadi inti yang stabil dengan jumlah N_3. Misalkan pada t = 0, $N_1 = N_{10}$, $N_2 = N_{20} = 0$, dan $N_3 = N_{30} = 0$. Aktivitas setiap unsur adalah

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \tag{3.9}$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \tag{3.10}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_2 N_2 \tag{3.11}$$

Integrasi dari persamaan pertama menghasilkan

$$N_1 = N_{10} e - ^{\lambda 1t} \tag{3.12}$$

Jika disubsitusikan ke persamaan berikutnya akan menghasilkan

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} \tag{3.13}$$

Kalikan kedua ruas suku dengan $e^{\lambda 2t}$ menghasilkan

$$e^{\lambda 2t} \frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 e^{\lambda 2t} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} e^{\lambda 2t}$$

atau

$$\frac{d}{dt}\left(N_2 e^{\lambda 2t}\right) = \lambda_1 N_{10} e^{(\lambda 2 - \lambda 1)t} \tag{3.14}$$

Integrasi dari persamaan di atas menghasilkan

$$N_2 e^{\lambda 2t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_{1\,1}} \; N_{10} e^{(\lambda 2 - \lambda 1)t} + C \tag{3.15}$$

Dimana C adalah tetapan integrasi yang dapat diperoleh dengan mengambil nilai

$$N_2 = N_{20} = 0 \qquad \text{pada t = 0}$$

sehingga

$$C = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}$$

Dengan memasukkan nilai C diperoleh

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}\left(e^{-\lambda 1t} - e^{-\lambda 2t}\right) \tag{3.16}$$

Secara sama juga diperoleh

$$N_3 = N_{10}\left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda 2t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda 1t}\right) \tag{3.17}$$

Kedua persamaan di atas menyatakan jumlah setiap inti pada waktu t.

Persamaan ini diturunkan untuk keadaan khusus dimana $N_1 = N_{10}$, dan $N_{20} = N_{30} = 0$ pada t = 0.

Jika pada N_{20} dan N_{30} tidak nol pada t = 0 maka persamaan nntuk N_1,N_2 dan N_3 adalah

$$N_1 = N_{10} e -^{\lambda 1t} \tag{3.18a}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10}\left(e^{-\lambda 1t} e^{-\lambda 2t}\right) + N_{20} e^{-\lambda 2t} \tag{3.18b}$$

$$N_3 = N_{30} + N_{20}\left(1 - e^{-\lambda 2t}\right) + N_{10}\left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda 2t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda 1t}\right) \tag{3.18c}$$

Persamaan umum untuk peluruhan berturutan adalah

$$\begin{gathered} dN_1 / dt = -\lambda_1 N_1 \\ dN_2 / dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ dN_3 / dt = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \\ . \\ . \\ . \\ dN_n / dt = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n \end{gathered} \tag{3.19}$$

3.4 Kesetimbangan Radioaktif

Aplikasi dari Hukum Peluruhan Radioaktif Berturutan berikut ini membahas dua kasus yang penting : (1) $\lambda_1 \approx \lambda_2$ dan (2) $\lambda_1 << \lambda_2$. Untuk kasus (1) menghasilkan kesetimbangan sementara dan kasus (2) menghasilkan kesetimbangan permanen.

3.4.1 Kesetimbangan Sementara (Transient)

Misalkan inti induk meluruh dengan tetapan peluruhan λ_1 dan inti anak meluruh dengan tetapan peluruhan λ_2. Usia hidup rata-rata $\tau_1 \approx \tau_2$,karena itu $\lambda_1 \approx \lambda_2$. Kita akan melihat bahwa jumlah atom inti anak mencapai suatu harga maksimum dan mulai berkurang dengan laju peluruhan pada usia hidup yang lebih lama.

Dari persamaan

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \left(e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t} \right) \tag{3.26}$$

Dapat diperoleh waktu t_m yaitu waktu N_2 mencapai nilai maksimum. Diferensiasi persamaan di atas terhadap waktu dengan memberikan nilai nol menghasilkan

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \left(-\lambda_1 e^{-\lambda 1 tm} + \lambda_2 e^{-\lambda 2 t} \right)$$

atau

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tag{3.20}$$

Sesudah waktu t_m laju peluruhan inti anak, dN_2/dt akan ditentukan oleh λ_1 atau λ_2 yang mana yang lebih kecil.

(i) Jika $\lambda_1 < \lambda_2$, ini berarti usia hidup inti induk lebih lama dari inti anak. Implikasinya adalah suku $e^{-\lambda 2t}$ lebih cepat mencapai nol dari pada suku $e^{-\lambda 1t}$, karena itu dapat diabaikan. Jadi

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(N_{10} e^{-\lambda 1 t} \right)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(N_1 \right) \tag{3.21}$$

Atau

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.22)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa inti anak meluruh dengan tetapan peluruhan inti induk dan ratio N_2/N_1 konstan. Dalam kasus ini dikatakan bahwa inti induk dan inti anak berada dalam keadaan kesetimbangan sementara.

Sementara ratio aktivitas inti anak terhadap inti induk adalah

$$\frac{dN_2/dt}{dN_1/dt} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.23)$$

(ii) Jika $\lambda_2 < \lambda_1$ dapat diperlihatkan bahwa

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(N_{10} e^{-\lambda 2t}\right) \quad (3.24)$$

Yang menunjukkan sesudah mencapai waktu tertentu inti anak akan meluruh dengan tetapan peluruhannya sendiri dan inti induk akan habis.

3.4.2 Kesetimbangan Permanen (Secular)

Jika usia hidup dari inti induk amat panjang dibandikan dengan inti anak atau $\lambda_1 << \lambda_2$, Untuk kasus ini

$$N_2 = \left[\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)\right] N_{10}\left(e^{-\lambda 1t} - e^{-\lambda 2t}\right) \quad (3.16)$$

Direduksi menjadi

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10}\left(1 - e^{-\lambda 2t}\right) \quad (3.25)$$

Sebab $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2$ dan $e^{-\lambda 1t} \approx 1$.

Jika t sangat besar dibandingkan dengan usia hidup inti anak , $t >> 1/\lambda_2$, dan $e^{-\lambda 2t}$ dapat diabaikan terhadap 1, maka persamaan dapat direduksi menjadi

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} \quad (3.26)$$

Ini menujukkan jumlah inti anak N_2 konstan. Dikatakan inti anak berada dalam kesetimbangan permanen terhadap inti induk. Karena usia paroh inti induk sangat besar jumlahnya hamper konstan, $N_{10} = N_1$, dan karena itu

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1$$

Dengan demikian syarat untuk kesetimbangan permanen adalah

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (3.27a)$$

Atau

$$N_1 / N_2 = \lambda_2 / \lambda_1 = \tau_1 / \tau_2 \qquad (3.27b)$$

Atau jumlah dari kedua elemen pada suatu waktu berbanding terbalik dengan tetapan peluruhan atau berbanding langsung dengan usia hidup rata-rata.

Untuk kasus banyak peluruhan berturutan dimana inti induk memiliki waktu paroh lebih besar dari inti hasil, memiliki syarat

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \ldots.. = \lambda_n N_n \qquad (3.28a)$$

Atau

$$N_1 / \tau_1 = N_2 / \tau_2 = N_3 / \tau_3 = \ldots.. = N_n / \tau_n \qquad (3.28b)$$

3.5 Deret Radioaktif Alamiah

Kebanyakan unsur radioaktif yang didapatkan di alam merupakan anggota dari 4 deret radioaktif alamiah. Penyebab terdapatnya hanya 4 deret semacam itu dapat diturunkan dari fakta bahwa peluruhan alfa mereduksi nomor massa sebuah inti dengan 4. Jadi nuklida yang nomor massanya memenuhi

A = 4n

Dengan n bilangan bulat, dapat meluruh menjadi yang lainnya dalam urutan yang menurun dari nomor massa. Nuklida radioaktif yang nomor massanya menuruti persamaan di atas dikatakan merupakan anggota dari deret 4n. Ini juga berlaku untuk nuklida yang nomor massanya A= 4n + 1, A = 4n + 2, dan A = 4n +3. Semua anggota deret akan berakhir pada inti mantap akhir yaitu Pb dan Bi. Tabel berikut merupakan daftar nama keempat deret radioaktif, nuklida induk, umur paroh dari nuklida induk, dan nuklida anak yang mantap yang merupakan produk akhir dari deret ini.

Nomor Massa	Deretan	Induk	Usia Paroh (Tahun)	Hasil Akhir
4n	Thorium	$^{232}_{90}Th$	$1,39 \times 10^{10}$	$^{208}_{82}Pb$
4n +1	Neptunium	$^{237}_{93}Np$	$2,25 \times 10^{6}$	$^{209}_{83}Bi$
4n +2	Uranium	$^{238}_{92}U$	$4,51 \times 10^{9}$	$^{206}_{82}Pb$
4n +3	Aktinium	$^{235}_{92}U$	$7,07 \times 10^{8}$	$^{207}_{82}Pb$

3.6 Satuan Radioaktivitas

Satuan SI dari aktivitas adalah Becquerel (Bq) dimana

1 becquerel = 1 Bq = 1 kejadian/detik

Aktivitas yang didapatkan dalam laboratorium biasanya sangat tinggi sehingga sering dipakai satuan MBq dan GBq. 1 MBq disebut juga 1 rutherford (rd).

Satuan tradisional dari aktivitas ialah curie (Ci) yang didefinisikan sebagai aktivitas 1 gram radium dimana hubungannya dengan satuan SI adalah

$$1 \text{ curie} = 1 \text{ Ci} = 3{,}70 \times 10^{10} \text{ kejadian/s} = 37 \text{ GBq}$$

PERTANYAAN DAN SOAL-SOAL

1. Tritium ${}_{1}^{3}H$ memiliki umur paroh 12,5 tahun terhadap peluruhan beta. Berapa fraksi dari sampel tritium akan tertinggal tidak meluruh setelah 25 tahun.

2. Umur paroh ${}_{11}^{25}Na$ ialah 15 hari. Berapa lamakah waktu yang diperlukan supaya 80 % dari sampel ini meluruh.

3. Aktivitas radionuklida tertentu menurun 15 % dari aktivitas semula dalam waktu 10 hari. Carilah usia parohnya.

4. Satu gram ${}_{88}^{226}Ra$ beraktivitas 1 Ci. Tentukan umur paroh ${}_{88}^{226}Ra$.

5. Massa ${}_{82}^{214}Pb$ 1 milicurie adalah 3 x 10^{-14} kg. Tentukan konstanta peluruhan ${}_{82}^{214}Pb$.