

## BAB 8 PROTEKSI RADIASI

Semua zat radioaktif dan radiasi mengandung bahaya luar dan dalam. Yang dimaksud dengan radiasi disini adalah radiasi pengion seperti sinar x, sinar gamma dan partikel bermuatan. Bahaya luar diakibatkan oleh pemaparan luar (*external exposure*) sedang bahaya dalam diakibatkan oleh pemaparan dari dalam (*internal exposure*).

Ada 3 prinsip yang dapat digunakan untuk menjaga atau mengawasi/mengontrol pemaparan terhadap bahaya radiasi : (1) menghilangkan bahaya, dalam hal ini jelas tidak dapat menggunakan atau bekerja dengan radiasi, (2) mengawasi bahaya, dalam hal ini memerlukan pengetrapan disain yang tepat untuk daerah kerja dan penggunaan peralatan yang baik untuk mengurangi bahaya, dan (3) mengawasi pekerja/orang, dalam hal ini memerlukan pengukuran secara berkala untuk mengontrol radiasi yang diterima orang dan sekelilingnya.

### 8.1 Interaksi Radiasi dengan Materi

#### 8.1.1 Radiasi Partikel Bermuatan

Kehilangan energi radiasi partikel bermuatan dalam suatu media adalah sebagai hasil interaksi elektromagnetik partikel bermuatan dengan atom dan molekul media. Sifat dan mekanisme kehilangan energi tergantung dari muatan, kecepatan partikel dan sifat media. Kecepatan hilangnya energi yang biasa disebut *stopping power*,  $-dE/dx$ , adalah

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi k^2 e^4 z^2 nZ}{m_0 v^2} \ln \frac{2m_0 v^2}{I_{ave}} \quad (8.1)$$

$k$  adalah konstanta gaya Coulomb,  $ze$  muatan partikel berat,  $m_0$  massa electron,  $v$  kecepatan partikel berat, dan  $nZ$  jumlah electron persatuan volume dalam bahan. Secara eksperimen, kehilangan energi ditentukan oleh jumlah pasangan ion yang dibentuk sepanjang lintasan partikel dalam bahan. Jika rata-rata diperlukan energi sebesar  $w$  untuk menghasilkan sepasang ion (inti positif dan electron), sedangkan jumlah pasangan ion yang terbentuk per satuan panjang adalah  $i$ , maka

$$-\frac{dE}{dx} = wi \quad (8.2)$$

#### 8.1.2 Radiasi x dan Gamma

Ionisasi yang terjadi karena interaksi radiasi x atau gamma ( $\gamma$ ) dengan materi akan lebih banyak daripada yang ditimbulkan oleh partikel bermuatan, karena electron yang dikeluarkan dari atom masih mempunyai energi yang cukup besar untuk mengionisasi atom yang lain. Peristiwa utama yang terjadi adalah : efek fotolistrik, hamburan Compton dan produksi pasangan.

### (1) Efek Fotolistrik

Bila foton mengenai electron dalam suatu orbit dalam atom, sebagian energi foton ( $W_0$ ) digunakan untuk mengeluarkan elektron dari atom dan sisanya dibawa oleh elektron sebagai energi kinetiknya. Seluruh energi foton dipakai dalam proses tersebut :

$$E = W_0 + E_K \quad (8.3)$$

Peristiwa efek fotolistrik ini terjadi pada energi yang rendah ( 1 Mev) dan  $Z$  yang besar. Untuk radiasi energi rendah foton berinteraksi dengan elektron orbit luar dan bila energi radiasi lebih besar, electron dari orbit dalam yang akan dikeluarkan. Bila elektron dikeluarkan dari orbit yang lebih dalam, kekosongan yang terjadi akan diisi oleh salah satu elektron dari orbit luar dan terjadilah pemancaran sinar x. Kadang-kadang sinar x ini akan mengenai dan mengeluarkan elektron dari orbit luar dengan energi yang sama dengan energi sinar x dikurangi dengan energi ikat elektron. Elektron semacam ini disebut elektron Auger. Proses ini terjadi dalam materi dengan nomor atom berat. Dalam unsur radioaktif yang memancarkan sinar gamma akan terjadi fotolistrik di dalam yang disebut *internal conversion*, dimana  $\gamma$  yang keluar akan membebaskan elektron dari orbit yang lebih dalam.

### (2) Hamburan Compton

Untuk energi foton atau gamma yang terletak antara 500 kev dan 5 Mev peristiwa interaksi yang dominan terjadi dalam unsur ringan dan sedang adalah hamburan Compton. Selain elektron dibebaskan dari atom, foton dihamburkan dengan sudut  $\theta$  dengan panjang gelombang yang berlainan. Perbedaan panjang gelombang  $\lambda' - \lambda$  memenuhi persamaan

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad (8.4)$$

Dari hukum kekekalan energi berlaku  $hf = hf' + E_K$ . Energi foton yang dihamburkan ( $hf'$ ) besarnya

$$hf' = \frac{m_0c^2}{\frac{m_0c^2}{hf} + 1 - \cos\theta} \quad (8.5)$$

Energi elektron yang dikeluarkan adalah

$$E_k = \frac{(hf)^2(1 - \cos\theta)}{m_0c^2 + hf(1 - \cos\theta)} \quad (8.6)$$

Hubungan antara sudut  $\theta$  dan  $\phi$  adalah

$$\cot g\phi = -\left(1 + \frac{hf}{m_0c^2}\right) \tan \frac{\theta}{2} \quad (8.7)$$

### (3) Produksi Pasangan

Foton, bila berinteraksi dengan medan listrik sekeliling partikel bermuatan, dapat hilang dan diganti dengan pembentukan pasangan electron-positron. Peristiwa ini banyak terjadi di daerah dekat inti atom. Energi terkecil agar terjadi peristiwa produksi pasangan ialah sama dengan  $2 m_0c^2 = 1,02 \text{ Mev}$ . Bila energi kinetik elektron dan positron masing-masing  $T_-$  dan  $T_+$

## 8.2 Radiasi Neutron

Menurut tingkat energi, neutron dapat diklasifikasi sebagai berikut : (1) neutron lambat ( $E_n < 0,025 \text{ ev}$ ), (2) neutron termik ( $0,025 \text{ ev} < E_n < 0,5 \text{ ev}$ ), (3) neutron epitermik ( $0,5 \text{ ev} < E_n < 10 \text{ kev}$ ), (4) neutron cepat ( $10 \text{ kev} < E_n < 10 \text{ Mev}$ ), (5) neutron relativistik ( $E_n > 10 \text{ Mev}$ ). Neutron termik akan ditangkap oleh inti atom materi yang dilalui, hingga akan terjadi inti yang tidak stabil yang akan memancarkan sinar gamma atau partikel lain. Pada umumnya terjadi reaksi inti  $(n,\gamma), (n,p), (n,\alpha)$ . Dalam uranium dan plutonium akan terjadi reaksi fisi. Ionisasi yang terjadi sebagai hasil dari interaksi neutron termik dengan materi adalah proses sekunder. Ionisasi dilakukan oleh sinar gamma yang keluar atau partikel bermuatan lain yang dihasilkan dari reaksi inti yang terjadi. Peristiwa interaksi yang terjadi untuk neutron termik dan neutron cepat kebanyakan berupa hamburan elastis dan inelastis, karena neutron tidak bermuatan.

## 8.3 Pembentukan Radikal

Jumlah ion yang terjadi akibat interaksi radiasi dengan materi adalah jumlah ion-ion primer yang terjadi langsung pada interaksi ditambah dengan jumlah ion-ion sekunder yang terjadi seperti halnya dalam interaksi sinar x atau  $\gamma$  dengan materi. Elektron yang dibebaskan dari ikatannya mempunyai energi kinetik yang cukup untuk mengionisasi atom-atom materi yang lain. Ion-ion yang terjadi dalam materi sistem biologi akan membentuk molekul-molekul baru atau membentuk radikal bebas yang akan merusak fungsi sel biologi. Karena sel biologi pada umumnya sebagian besar terdiri dari molekul-molekul air maka akan terjadi reaksi ionisasi air dan pembentukan radikal bebas ( $\text{OH}^*$ ) dari air dan bahan organik. Radikal ini mengadakan reaksi molekuler hingga terbentuk  $\text{H}_2\text{O}_2$  peroksida lain yang merupakan racun untuk tubuh manusia.

#### 8.4 Atenuasi

Bila jumlah ionisasi yang dibentuk ( $I$ ) sebelum dan sesudah melalui suatu lapisan materi diukur, maka akan terlihat bahwa pengurangan jumlah ionisasi persatuan panjang

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I \quad (8.8)$$

Dimana  $\mu$  adalah koefisien atenuasi linier. Persamaan di atas menghasilkan

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (8.9)$$

Pada umumnya digunakan pengertian koefisien absorpsi massa, dimana  $\mu$  dalam persamaan di atas diganti dengan  $\mu/\rho$ , dimana  $\rho$  adalah kerapatan penyerap.

Tebal lapisan materi dimana intensitas yang keluar menjadi setengah dari intensitas yang datang disebut HVL (Half Value Layer) atau lapisan harga paro. Besarnya HVL ( $x_{1/2}$ ) dapat ditentukan secara

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} I_0 &= I_0 e^{-\mu x_{1/2}} \\ x_{1/2} &= \frac{0,693}{\mu} \end{aligned} \quad (8.10)$$

#### 8.5 Besaran dan Satuan Radiologi

ICRU (International Commission on Radiological Units and Measurements) menentukan besaran-besaran radiologi beserta satuannya yang banyak digunakan dalam bidang proteksi radiasi.

### 8.5.1 Pemaparan (exposure)

Pemaparan (X) adalah perbandingan jumlah muatan listrik semua ion dari satu tanda yang ditimbulkan dalam udara ( $\Delta Q$ ), bila semua elektron yang dikeluarkan oleh foton dalam elemen volume udara dengan massa  $\Delta m$ , seluruhnya berhenti dalam udara

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad (8.11)$$

Satuan : Roentgen (R) :  $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$

### 8.5.2 Kecepatan Pemaparan (exposure rate)

Kecepatan pemaparan (ER) ialah besar pemaparan per satuan waktu.

$$ER = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (8.12)$$

Satuannya ER = R/jam

### 8.5.3 Dosis serap (absorbed dose)

Dosis serap (D) ialah perbandingan energi yang diberikan oleh radiasi pengion kepada materi ( $\Delta E_D$ ) dalam elemen volume yang mempunyai massa  $\Delta m$ .

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} \quad (8.13)$$

Satuannya : rad :  $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 10^{-2} \text{ J/kg}$

### 8.5.4 Linear Energy Transfer (LET)

Linear Energy Transfer partikel bermuatan dalam materi ialah perbandingan energi rata-rata yang diberikan setempat pada materi oleh partikel bermuatan dengan energi tertentu (dE) yang melalui jarak dl

$$LET = \frac{dE}{dl} \quad (8.14)$$

Satuan : LET :erg/cm

### 8.5.5 Dosis ekivalen (DE)

Sejumlah energi serap yang sama dari berbagai macam radiasi akan menimbulkan efek yang berbeda. Karenanya untuk pengukuran digunakan terminology Relative Biological Effectiveness (RBE) yang didefinisikan sebagai

RBE = Dosis serap sinar x (250 kV) yang menimbulkan efek biologi tertentu

Dosis jenis radiasi yang menimbulkan efek biologi yang sama

Efek biologi suatu macam radiasi jadinya tergantung pada dosis serap dan RBE. Satuan radiologi yang baru didefinisikan ialah Roentgen Equivalent Man (REM), sebagai dosis serap radiasi yang secara biologi ekuivalen dengan dosis serap satu rad radiasi sinar x.

$$DE (\text{rem}) = D (\text{rad}) \times \text{RBE} \quad (8.15)$$

Faktor RBE biasanya digunakan dalam bidang radiobiology, sedang dalam bidang proteksi radiasi digunakan factor-faktor modifikasi, ialah Quality Factor (QF) yang tergantung pada LET, dan Faktor Distribusi (DF), factor efek biologi distribusi zat radioaktif yang non uniform di dalam tubuh

$$DE = D \times \text{QF} \times \text{DF} \quad (8.16)$$

Satuan DE dalam rem , D dalam rad.

### 8.5.6 Hubungan antara Roentgen dan Rad

Menurut Bragg Gray, energy radiasi diterima materi sebesar

$$\text{Energi yang diterima} = \left( \frac{\mu}{\rho} \right) W \cdot J \quad (8.17)$$

$\left( \frac{\mu}{\rho} \right)$  = koefisien absorpsi massa

W = energy pembentukan satu pasang ion

J = jumlah pasang ion per gram massa

Bila diambil harga W di udara = 34 eV/pasang ion, maka didapat

D di udara = 0.877  $\chi$  rad

D = dosis serap

$\chi$  = pemaparan dalam satuan Roentgen

## 8.6 Dosis Maksimum Yang Diperkenankan

Manusia mendapatkan pemaparan radiasi secara kontinyu dari sumber radiasi alamiah dan sinar kosmis. Dosis rata-rata yang diterima dari radiasi alamiah ini diperkirakan 100 milirem per tahun, meskipun pada beberapa tempat radiasi alamiahnya (*background radiation*) ada yang 10-30 kali lebih besar. Pemaparan radiasi yang besar dapat

menimbulkan berbagai kerusakan dalam tubuh manusia seperti *skin erythema*, *catarract*, rambut gugur dan tumbuh tumor.

ICRP (International Commission on Radiological Protection) mendefinisikan Maximum Permissible Dose (MPD) , yaitu dosis maksimum yang diperkenankan untuk perseorangan sebagai dosis radiasi akumulasi selama jangka waktu yang lama tidak mungkin memberikan kerusakan somatik maupun genetik.

Pada tahun 1965 ICRP memberikan rekomendasi pada limit dosis radiasi yang boleh diterima oleh dua kategori orang, yaitu a. Pekerja radiasi, b. Umum

Tabel 1. MPD untuk Pekerja radiasi dan Umum

Organ atau Jaringan	Pekerja Radiasi	Umum
Gonad, sumsum tulang merah, seluruh tubuh	5 Rem/tahun	0,5 Rem/tahun
Kulit, tulang,dan thyroid	30 Rem/tahun	3 Rem/tahun
Tangan, lengan, kaki, betis	75 Rem/tahun	7,5 Rem/tahun
Organ lain	15 Rem/tahun	1,5 Rem/tahun
Tiroid anak sampai umur 16 tahun		1,5 Rem/tahun

seperti dapat dilihat pada Tabel 1.

### 8.7 Prinsip-Prinsip Prosedur Proteksi Radiasi

Prinsip menghilangkan bahaya radiasi tidak mungkin dilakukan, karena berarti menghilangkan sumber radiasi. Karena itu filosofi setiap program pengawasan atau prosedur proteksi radiasi ialah mengurangi pemaparan luar maupun dalam serendah mungkin. Dalam prakteknya dosis radiasi yang diterima harus lebih rendah dari MPD.

Ada tiga faktor yang menentukan pemaparan radiasi total yang diterima orang.

#### a. Faktor Waktu

Makin lama seseorang berada dalam medan radiasi, makin besar pemaparan dan dosis serap yang diterima. Hubungan antara pemaparan dan waktu, bila kecepatan pemaparan adalah  $Q$  R/jam dan berada dalam medan radiasi itu selama  $\Delta t$  jam, maka pemaparan yang diterima adalah sebesar

$$Q \times \Delta t \text{ Roentgen} \quad (8.18)$$

Faktor waktu ini memegang peranan dalam hal terjadi kecelakaan atau keadaan darurat di mana pekerjaan harus dilaksanakan dalam medan radiasi yang kuat.

b. Faktor Jarak

Bila ukuran sumber radiasi dibandingkn dengan jarak adalah kecil hingga sumber radiasi dapat dianggap sebagai titik sumber, maka pemaparan akan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak terhadap sumber.



Misalkan  $S$  adalah energi radiasi total yang dipancarkan secara isotropik, maka intensitas radiasi di titik A dengan jarak  $R_A$  ialah

$$I_A = \frac{S}{4\pi R_A^2} \quad (8.19)$$

Dan di titik B dengan jarak  $R_B$  ialah

$$I_B = \frac{S}{4\pi R_B^2} \quad (8.20)$$

Maka

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{R_B^2}{R_A^2} \quad (8.21)$$

Atau

$$I_A : I_B = \frac{1}{R_A^2} : \frac{1}{R_B^2} \quad (8.22)$$

Hukum ini disebut *inverse square law*.

c. Faktor Pelindung

Bila harus bekerja pada jarak yang dekat dengan sumber radiasi dan dalam waktu yang lama, pelindung atau shielding dapat mereduksi pemaparan sehingga serendah mungkin. Keefektifan pelindung ditentukan oleh interaksi radiasi dengan atom-atom pelindung di



mana interaksi ini tergantung pada macam radiasi, energi radiasi dan nomor atom materi pelindung.

- (1) Pelindung untuk radiasi alfa sangat efisien karena stopping power besar atau ionisasi spesifik radiasi alfa besar. Radiasi alfa dapat diserap oleh kertas yang tebalnya  $< 1/64$  inci dan juga oleh lapisan aluminium.
- (2) Dalam menggunakan pelindung untuk radiasi beta, radiasi beta lebih jauh menembus materi dibandingkan radiasi alfa. Untuk memberhentikan radiasi beta pada umumnya digunakan materi dengan  $Z$  rendah, kemudian disambung dengan materi yang mempunyai  $Z$  besar untuk mereduksi radiasi *bremstrahlung*.
- (3) Materi pelindung yang digunakan dalam radiasi elektromagnetik (sinar x dan gamma) ialah bahan-bahan yang mempunyai rapat massa yang tinggi, misalnya Pb, U, Au, Fe, Cr dan Ni. Tebal pelindung dapat ditentukan dengan rumus atenuasi dan HVL. Penggunaan adukan beton efektif karena mengandung  $Z$  yang tinggi, hanya hamburan menjadi lebih banyak.
- (4) Persoalan pelindung untuk radiasi neutron timbul karena produksi radiasi gamma akibat penyerapan neutron. Bahan yang efektif untuk atenuasi neutron pada umumnya tidak baik sebagai pelindung gamma. Unsur-unsur dengan nomor massa rendah ialah pelindung dan moderator neutron yang ideal, misalnya hidrogen dalam bentuk air, plastik atau parafin, berilium, karbon dalam bentuk grafik. Beton merupakan bahan yang baik juga karena mengandung air. Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pemilihan pelindung radiasi neutron diantaranya ialah apakah materi akan menurunkan energi neutron secara efektif dan mempunyai penampang lintang termik yang besar dan yang terakhir apakah juga efektif dalam atenuasi radiasi gamma yang ditimbulkannya. Faktor pelindung sangat memegang peranan dalam pengangkutan zat radioaktif dan sumber radiasi lain.

## PERTANYAAN DAN SOAL-SOAL

1. Tentukanlah besaran-besaran radiologi beserta satuannya yang banyak digunakan dalam bidang proteksi radiasi.
2. Koefisien absorpsi linier dari sinar gamma berenergi 1 Mev dalam timbal adalah  $78 \text{ m}^{-1}$ . Carilah tebal timbal yang diperlukan untuk mereduksi radiasi menjadi setengahnya berkas sinar gamma.
3. Koefisien absorpsi linier dari sinar x berenergi 50 kev dalam udara pada permukaan laut adalah  $5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ . Dengan berapa banyak intensitas berkas sinar x seperti itu tereduksi jika melalui (a) udara 0,5 m, (b) melalui udara 5 m.
4. Koefisien absorpsi massa dari sinar x  $0,5 \text{ \AA}$  dalam timbal dan dalam besi berturutan adalah  $53$  dan  $14 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Berapa tebal perisai besi supaya menimbulkan perlindungan yang sama dari sinar x seperti timbal yang tebalnya 1 cm. Kerapatan besi  $8 \text{ g/cm}^3$  dan timbal  $11 \text{ g/cm}^3$ .
5. Koefisien absorpsi massa tembaga untuk sinar x 80 kev adalah  $53 \text{ cm}^2/\text{g}$  dan kerapatan tembaga  $8,9 \text{ g/cm}^3$ .
  - (a) Carilah intensitas relatif berkas sinar x setelah berkas itu menembus selaput tembaga setebal 1 mm.
  - (b) Berapa tebal tembaga yang diperlukan untuk mereduksi intensita berkas menjadi setengahnya.