

Sudi Ariyanto"

Abstrak. PERHITUNGAN PENAHAN RADIASI ALPHA, BETA dan GAMMA. Salah satu cara melindungi manusia dari radiasi adalah penggunaan penahan radiasi. Perhitungan penahan radiasi dilakukan dengan memperhatikan jenis dan energi radiasi dan berdasarkan interaksi radiasi dengan materi dapat diketahui bahan, perisai yang tepat. Dalam tulisan ini dibahas perhitungan perisai radiasi untuk alpha, beta, gamma dan sinar-X.

Abstract COMPUTATION OF RADIATION SHIELDING AGAINST ALPHA, BETA and GAMMA. Radiation shielding utilization is one of the methods in radiation protection. Computation of radiation shielding is implemented by considering type and energy of radiation, and it can be defined the most suitable material for certain type of radiation based on the interaction of radiation with matters. In this paper computation of radiation shielding against alpha, beta, gamma and x-ray is discussed.

Pendahuluan

Radiasi pada dasarnya adalah proses pemindahan energi dan salah satu di antaranya adalah radiasi nuklir, berupa pancaran partikel alpha, beta, sinar gamma dan lain-lain. Karena radiasi ini dapat memberikan bahaya pada makhluk hidup (manusia), maka perlu diupayakan adanya proteksi. Tujuan utama proteksi radiasi adalah memastikan bahwa radiasi yang diterima setiap individu serendah mungkin atau tidak melebihi nilai maksimum yang diizinkan. Tujuan proteksi radiasi ini dicapai dengan satu atau kombinasi beberapa metode berikut:

1. Meminimalkan waktu paparan
Semakin kecil waktu yang digunakan dalam berhubungan dengan sumber radiasi, maka paparan (dosis) yang diterima semakin kecil. Dosis radiasi yang diterima berbanding lurus dengan jumlah waktu.
2. Memaksimalkan jarak dari sumber radiasi
Jarak memiliki fungsi yang cukup signifikan dalam jumlah penerimaan radiasi (dosis). Semakin besar jaraknya

dari sumber, semakin kecil jumlah radiasi yang diterima. Jumlah radiasi yang diterima berbanding terbalik dengan kuadrat jarak.

3. Menggunakan penahan radiasi
Penahan radiasi memiliki arti penting dalam mengurangi jumlah radiasi yang diterima seseorang. Pengurangan radiasi bergantung kepada jenis dan energi radiasi, jenis material penahan, dan ketebalannya. Pengurangan radiasi ini berbanding terbalik secara eksponensial dengan sifat fisis penahan dan ketebalannya.

Di dalam tulisan ini hanya dibahas masalah penahan radiasi dari isotop pemancar radiasi alpha, beta, gamma dan fasilitas sinar-X. Di sini istilah penahan dan perisai digunakan secara berganti-ganti dengan maksud yang sama.

Perhitungan penahan atau perisai radiasi biasanya dilakukan dengan menggunakan persamaan atenuasi radiasi dalam materi. Persamaan atenuasi dinyatakan dengan relasi eksponensial berikut ini.

$$I = I_0 \cdot e^{-Jt} \quad (1)$$

di mana J dan I_0 adalah intensitas radiasi setelah dan sebelum menembus materi, J adalah koefisien serapan dan t adalah ketebalan atau jangkauan. Koefisien serapan bergantung kepada jenis radiasi, energi radiasi, jenis interaksi antara radiasi dengan materi, dan jenis materi yang ditembus. Sebagai pengganti persamaan (1) di atas, seringkali digunakan persamaan berikut,

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_0} &= \frac{1}{2^{hvt}} \\ &= \frac{1}{10^{t/M}} \end{aligned} \quad (2)$$

dengan hvt adalah ketebalan yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi hingga setengahnya (*half value thickness*), sedangkan t/M adalah ketebalan yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi hingga sepersepuluhnya (*tenth value thickness*).

Partikel Alpha

Radiasi alpha adalah pemancaran partikel bermuatan positif yang sama dengan inti atom Helium dengan 2 buah proton dan 2 buah neutron. Partikel alpha ini berkurang energinya setiap kali melakukan tumbukan dengan atom materi yang dilaluinya dengan proses *ionisasi* dan *eksitasi*. Ionisasi terjadi saat elektron di suatu lintasan ditabrak oleh partikel alpha dan keluar dari atom, sedangkan eksitasi terjadi saat elektron yang ditumbuk pindah ke lintasan dengan tingkat energi yang lebih tinggi.

Oleh karena bermassa besar, partikel alpha mempunyai daya ionisasi besar, dan kehilangan energi besar setiap kali bertumbukan. Oleh karena itu jarak jangkauannya hanya beberapa centimeter di udara bergantung energinya (antara 4 -11,5 em). Beberapa milimeter bahan seperti karet, kertas atau karton sudah cukup untuk menahan partikel ini. Partikel ini tidak

berbahaya dari segi proteksi radiasi eksterna karena tidak dapat menembus lapisan basal kulit manusia.

Penentuan li perisai radiasi bisa dilakukan dengan menggunakan persamaan (1) atau bisa juga ditentukan dari persamaan empiris.

Geiger-Nuttal menunjukkan hubungan antara jangkauan rerata partikel alpha di udara sebagai fungsi energi sebagai berikut,

$$R = 0,318E^{3/2} \quad (3)$$

di mana R adalah jangkauan rerata dalam em, E adalah energi partikel alpha dalam MeV. Persamaan ini dengan baik dapat menunjukkan data dalam rentang energi 4 - 7 MeV. Jika diterapkan di luar rentang energi ini persamaan (1) akan menunjukkan nilai yang lebih kecil seperti terlihat pada Gambar 1 hingga 10% untuk energi lebih besar daripada 10 MeV. Untuk rentang hingga 11 MeV, penulis mengusulkan persamaan empiris berikut dari Gambar 1,

$$R = 0,328E^{3/2} \quad (4)$$

Cember [2] menyatakan bahwa untuk energi di bawah 4 MeV, jarak jangkauan dinyatakan secara sederhana dengan persamaan (5),

$$R = 0,56E \quad (5)$$

Persamaan (3), (4) dan (5) di atas hanya berlaku untuk medium udara. Untuk medium selain udara, jarak jangkauan dapat dihitung dengan persamaan berikut [2],

$$R_{\text{medium}} = 32 \times 10^{-4} \cdot R_{\text{udara}} \cdot \frac{A}{p} \quad (6)$$

di mana A dan p adalah nomor massa dan kerapatan materi yang dilewati, sedangkan jangkauan di udara R_{udara} dapat dihitung dengan persamaan (3), (4) atau (5). Dengan mengetahui jarak jangkauan, maka dapat dirancang perisai untuk energi alpha

tertentu. Ketebalan perisai hams lebih besar daripada jarak jangkauan yang dihitung dengan persamaan di atas.

Partikel Beta

Partikel Beta mempunyai massa yang sama dengan massa elektron. Karena massanya lebih kecil daripada massa partikel alpha, maka daya ionisasinya lebih kecil dan akibatnya daya tembusnya atau jangkauannya lebih panjang daripada partikel alpha. Jangkauannya di udara kira-kira 1 m untuk energi 0,5 MeV dan kira-kira 10 m untuk energi 3 MeV.

Ada dua hal yang perlu diperhatikan dalam membuat penahan untuk partikel beta ini berdasarkan interaksinya dengan materi yang dilewati. Partikel beta berinteraksi dengan materi melalui dua cara yaitu ionisasi dan brehmstrahlung. Brehmstrahlung terjadi pada saat partikel beta memasuki wilayah di sekitar inti atom dan karena adanya gaya Coulomb yang menariknya partikel beta terdefleksi dari lintasannya semula. Sebagai akibatnya, partikel beta mengalami perlambatan dan proses perlambatan ini menghasilkan foton atau sinar-X dengan spektrum tenaga kontinu.

Agar pengurangan energi melalui ionisasi lebih besar, maka digunakan bahan dengan kerapatan tinggi. Oleh karena fraksi energi partikel beta yang dapat diubah menjadi foton dalam proses brehmstrahlung berbanding lurus dengan nomor atom materi yang dilewati, maka digunakan bahan dengan nomor atom rendah biasanya dengan $Z \sim 13$. Bahan yang dapat dipakai sebagai penahan untuk partikel beta adalah aluminium, plexiglas dan karet. Untuk beta dengan energi tinggi kontribusi brehmstrahlung semakin besar, maka perlu ditambahkan materi berkerapatan tinggi seperti timbal.

Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2, jangkauan partikel beta dapat ditentukan dengan menggunakan rumus Katz & Penfold [2] sebagai berikut,

$$R = 53(\epsilon - 106) \quad E > 2,5 \text{ MeV} \\ = 412E - 265 - 0,094 \ln E \quad E < 2,5 \text{ MeV} \quad (7)$$

di sini R adalah jangkauan dalam mg/cm^2 dan E adalah energi dalam MeV. Ketebalan minimum yang diperlukan adalah $x = R/\rho$, dengan ρ adalah kerapatan materi dalam g/cm^3 .

Kedua persamaan empiris koefisien serapan massa dan hvt untuk materi Aluminium di bawah ini dapat digunakan bersama persamaan (1) dan (2) [6],

$$f_{\text{im}} = \frac{f_{\text{ij}}}{\rho} = \frac{17}{\epsilon^{1,14} \text{ maks}} \quad (8)$$

dan

$$hvt = 004E_{\text{maks}}^{1,14} \quad (9)$$

di mana f_{im} adalah koefisien serap (cm^2/g), f_{ij} adalah koefisien serapan linier (cm^{-1}), ρ adalah kerapatan Aluminium (g/cm^3), dan E_{maks} adalah energi maksimum partikel beta (MeV).

Seperti telah disebutkan di atas, salah satu faktor yang hams dipertimbangkan dalam perhitungan perisai partikel beta adalah brehmstrahlung. Berikut ini adalah salah satu card menentukan tebal perisai tambahan untuk menahan sinar-x yang keluar pada proses brehmstrahlung ini.

Pertama, perlu diketahui berapa besar energi partikel beta yang berubah menjadi energi foton atau sinar-X. Fraksi energi partikel beta yang dapat berubah menjadi foton dapat dihitung dengan persamaan berikut ini [2],

$$f = 3,5 \times 10^{-4} Z E_{\text{maks}} \quad (10)$$

di mana f adalah fraksi energi beta yang berubah menjadi foton, Z adalah nomor atom perisai dan E_{maks} adalah energi maksimum beta dalam MeV.

Meskipun energi rerata partikel beta adalah sepertiga energi maksimumnya, tetapi untuk proteksi radiasi diasumsikan bahwa yang terserap adalah energi maksimum betanya. Energi maksimum

yang terserap oleh medium per detik dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$E_{li} = A \times E_{maks} \quad (11)$$

di sini A adalah aktivitas dalam disintegrasi per detik, E_{maks} adalah energi maksimum per disintegrasi.

Sebelum menentukan berapa tebal perisai yang diperlukan, maka perlu dihitung terlebih dahulu berapa besar laju dosis serapnya pada jarak 1m di udara dengan persamaan berikut ini,

$$D_0 = \frac{A \times E_p \times I'}{p \times 4\pi r^2} \times C_j \quad (12)$$

di mana I' adalah koefisien serapan di udara (m^{-1}), p adalah kerapatan udara ($1,293 \text{ kg/m}^3$) dan r_j adalah jarak 1 meter dari sumber, sedangkan C_j adalah faktor konversi satuan ($5,76 \times 10^{-7} \text{ [mSv/jam]/[Mev/kg s]}$). Satuan laju dosis di atas adalah mSv/jam.

Tebal perisai dapat dihitung menggunakan rumus atenuasi sebagai berikut,

$$D = D_0 e^{-\mu t} \quad (13)$$

di mana μ adalah koefisien serapan bahan perisai terhadap foton dan t adalah ketebalan perisai. Laju dosis setelah melewati perisai dapat ditetapkan sama dengan dosis maksimum yang diizinkan (*maximum permissible dose*, MPD). Penentuan ketebalan dapat dilakukan dengan lebih mudah jika diketahui *half-value thickness* (HVT) atau *tenth-value thickness* (TVT). Dengan menggunakan HVT atau TVT, persamaan di atas dapat diubah menjadi persamaan berikut.

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1}{2^{t/HVT}} \quad (14)$$

$$= \frac{1}{10^{t/TVT}}$$

Jika terdapat satu atau lebih isotop dengan lebih dari satu pancaran energi, maka harus

dihitung dosis atau intensitas untuk masing-masing energi dan semuanya dipakai untuk menentukan ketebalan perisai. Dalam hal ini, persamaan (13) harus dimodifikasi sebagai berikut,

$$\dot{D} = \dot{D}_1 e^{-\mu_1 t} + \dot{D}_2 e^{-\mu_2 t} + \dots \quad (15)$$

dengan subskrip 1,2 dan seterusnya menunjukkan perhitungan untuk masing-masing energi. Oleh karena persamaan (15) di atas lebih kompleks daripada persamaan (13) dan (14), maka ketebalan perisai ditentukan dengan cara perhitungan iterasi atau *trial and error*.

Sinar Gamma

Pengurangan energi Sinar Gamma atau Sinar-X oleh materi yang dilaluinya terjadi terutama melalui proses efek fotolistrik, efek Compton, dan produksi pasangan.

Efek fotolistrik adalah suatu kejadian penumbukan elektron pada lintasannya oleh foton/sinar-X/sinar gamma sehingga elektron terlepas dari lintasannya. Efek Compton adalah kejadian tumbukan antara sinar-X dengan elektron bebas dan pengurangan energi bergantung kepada sudut hamburannya. Produksi pasangan adalah proses berubalnya foton ketika melewati medan inti menjadi elektron dan positron. Efek Fotolistrik dominan pada tingkat energi rendah, efek Compton dominan pada energi menengah, sedangkan pada energi tinggi Produksi Pasangan yang dominan.

Oleh karena kebolehan interaksi lebih besar pada materi dengan nomor atom tinggi, maka materi yang cocok sebagai perisai sinar gamma/sinar-X adalah timbal dan besi. Dalam rentang energi menengah (0,5 - 0,75 MeV), kerapatan material perisai lebih penting daripada nomor atom, sedangkan untuk energi tinggi dan rendah materi dengan nomor atom tinggi lebih efektif.

Masing-masing interaksi di atas memiliki koefisien serapan masing-masing. Untuk perhitungan perisai radiasi, digunakan

koefisien total yang merupakan penjumlahan masing-masing koefisien.

Menurut Bethe, untuk energi gamma di bawah 0,5 MeV, koefisien serapan linier dapat ditentukan, sebagai berikut [3],

$$\mu_{tr} = 40NS(Z - 0,3)^5 E^{-3,5} \quad (16)$$

di sini μ_{tr} dalam cm^{-1} , N adalah jumlah atom per cm^3 , S adalah tetapan sebagai fungsi energi E dan nomor atom Z , Energi E dalam keV. Tetapan S didapatkan, secara empiris sebagai berikut,

$$S = -0,18 + 0,28 \log(E/Z^2) \quad (17)$$

di sini perlu diperhatikan bahwa satuan energi E untuk menghitung S adalah eV.

Persamaan di bawah adalah persamaan lain yang seringkali dipakai [1],

$$\mu_p = 1,0187 \times 10^{-33} NZ^5 E^{-3,5} \quad (18)$$

Persamaan (18) di atas hanya berlaku untuk fotolistrik yang terjadi pada kulit atom K yang merupakan 80% dari keseluruhan interaksi fotolistrik [1], E di sini dalam MeV.

Dengan menggunakan data perhitungan teori yang lebih teliti pada referensi [2] hal 403, penulis mendapatkan persamaan berikut,

$$\mu_p = 0,175 \times 10^{-32} NZ^5/E \quad (19)$$

di mana energi E dalam MeV. Persamaan (19) ini menunjukkan bahwa pengaruh energi tidak sebesar seperti yang diperkirakan oleh persamaan (16) maupun (18).

Seperti ditunjukkan pada persamaan-persamaan di atas,ampang lintang efek fotolistrik berbanding lurus dengan Z^5 . Hal ini menunjukkan bahwa penurunan energi melalui efek fotolistrik ini lebih besar pada materi dengan nomor atom besar.

Hubungan antara energi denganampang lintang mikroskopis (μ_p/N) untuk Aluminium ($Z=13$) dan Pb ($Z=82$) ditunjukkan pada Gambar 3 bersama ketiga persamaan tersebut di atas.

Klein-Nishina mendapatkan persamaan koefisien serapan linier untuk efek Compton pada energi foton jauh di atas 0,511 MeV (lebih besar daripada 3 MeV), sebagai berikut,

$$\sigma_c = \frac{\mu_c}{N} = \frac{Z}{E} \left(\ln \frac{2E}{m_0 c^2} + \frac{1}{2} \right) \quad (20)$$

di sini satuan yang digunakan adalah 10^{-25}cm^2 , E dalam MeV, $m_0 c^2$ adalah kesetaraan energi untuk massa diam elektron (0,511 MeV). Untuk energi yang lebih kecil, penulis mengusulkan persamaan pendekatan berikut,

$$\sigma_c = \frac{Z}{E} (2,23 - 1,07 \ln E) \quad (21)$$

dengan E adalah energi dalam MeV. Gambar 4 menunjukkan prediksi kedua persamaan di atas terhadap data [1].

Persamaan (20) dan (21) menunjukkan bahwa koefisien serapan linier berbanding lurus dengan jumlah atom per cm^3 N dan nomor atom Z atau

$$\mu_c \approx NZ \quad (21a)$$

Harga N ini didapatkan dari perkalian antara Bilangan Avogadro N_0 dan kerapatan materi ρ dibagi dengan nomor massa A , $N = N_0 \times \rho / A$. Di sini Bilangan Avogadro N_0 besarnya sama dengan $6,02486 \times 10^{23}$ atom per gram atom. Jika N ini dimasukkan ke dalam persamaan (21a) akan didapatkan,

$$\mu_c \approx N_0 \rho \frac{Z}{A} \quad (21b)$$

Jika masing-masing sisi pada persamaan (21b) ini kita bagi dengan kerapatan ρ , maka didapatkan koefisien serapan massa untuk hamburan Compton,

Jika faktor ini dipertimbangkan, maka persamaan (1) harus dimodifikasi menjadi

$$\mu_m = \frac{\mu_c}{\rho} \approx N_0 \frac{Z}{A} \quad (21c)$$

Kecuali hidrogen, harga Z/A untuk kebanyakan isotop adalah sekitar 0,5, oleh karena itu untuk energi tertentu harga koefisien serapan massa untuk hamburan Compton ini konstan atau tidak bergantung kepada jenis materi.

Koefisien serapan untuk produksi pasangan diberikan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \mu_p &= NZ^2(E - 1.022) & E?: 1.022\text{MeV} \\ &= NZ^2 \ln E & E \gg 1.022\text{MeV} \end{aligned} \quad (22)$$

Jadi koefisien serapan total untuk radiasi gamma dihitung sebagai berikut,

$$\mu_t = \mu_r + \mu_c + \mu_p \quad (23)$$

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara energi foton dengan koefisien serapan total untuk air, aluminium, besi dan timbal...

Dari persamaan penampang lintang untuk efek fotolistrik, Compton dan Produksi Pasangan dapat diketahui kemudian bahwa radiasi gamma terserap lebih banyak oleh materi dengan nomor atom tinggi. Oleh karena itu materi seperti besi dan timbal maupun beton digunakan sebagai penahan radiasi untuk radiasi gamma.

Di dalam perhitungan penahan radiasi gamma terdapat sebuah faktor yang perlu diperhatikan yaitu *build-up factor* (B). Faktor ini menunjukkan perbandingan antara jumlah foton langsung tembus dan yang terhambur dengan jumlah foton yang langsung dan dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} B &= \frac{\text{foton langsung} + \text{foton terhambur}}{\text{foton langsung}} \\ &= 1 + \frac{\text{foton terhambur}}{\text{foton langsung}} \end{aligned}$$

$$I = BI_0 e^{-\mu t} \quad (24)$$

Harga B bergantung kepada besarnya energi foton dan jarak relaksasi yang merupakan hasil kali antara koefisien atenuasi linier dengan panjang perisai (atau jarak lintasan).

Dalam perhitungan perisai sinar gamma, dapat digunakan pendekatan sebagai berikut. Jika $Ilt < 1$, maka nilai B ditentukan sama dengan 1. Untuk energi foton di bawah 4 Mev, $B = 1.2(I+Ilt)$. Nilai B ini bisa juga dipakai untuk energi di atas 4 Mev dengan $Ilt < 10$, sedangkan untuk $\mu t > 10$ digunakan $B = Ilt$. Hal ini sama dengan yang digunakan oleh Tojo [3].

Persamaan (24) ini tidak bisa langsung diselesaikan seperti persamaan (1) atau (2). Cara yang biasa ditempuh untuk menentukan tebal perisai adalah *trial and error*. Penulis di sini mengusulkan penentuan ketebalan perisai dengan cara grafis. **Gambar 6** menunjukkan hubungan antara jarak relaksasi dengan 1/10 untuk masing-masing nilai B. Cara penentuan tebal dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. tentukan nilai I/I_0 yang ingin dicapai,
2. tarik garis tegak lurus sumbu Y hingga memotong kurva untuk nilai B seperti yang ditetapkan di atas,
3. tarik garis tegak lurus sumbu X hingga memotong titik pertemuan itu,
4. tebal t dapat ditentukan dari hasil pembacaan perpotongan garis tegak lurus dengan sumbu X yang dilakukan pada langkah 3 di atas.

Laju paparan pada suatu titik berjarak d meter dari sumber dengan aktivitas sebesar A Ci tanpa perisai dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$\dot{X} = r - \frac{A}{d} \quad (25)$$

di mana F adalah faktor gamma menyatakan besar laju dosis paparan sumber radiasi gamma pada jarak 1 meter dan aktivitas 1 Currie dengan satuan $R\text{-m}^2/\text{Ci-jam}$. Jika laju dosis ini tidak melebihi nilai maksimum yang diizinkan, maka perisai tidak diperlukan. Nilai batas untuk pekerja radiasi adalah $2,5\text{mR/jam}$, sedangkan untuk publik adalah $0,25\text{mR/jam}$. Jika diperlukan, perisai radiasi, maka persamaan (25) pun berubah menjadi

$$\bar{X} = \bar{X}_0 Be^{-\mu x} \quad (26)$$

di mana \bar{X}_0 adalah laju paparan yang dihitung dengan persamaan (25).

Apabila sumber radiasi ganuna memiliki lebih dari satu energi, maka semua energi harus diperhatikan dalam perhitungan faktor ganuna seperti yang telah dijelaskan untuk perhitungan brehmstrahlung. Untuk medium udara, persamaan berikut ini dapat digunakan, [3].

$$r = 0,52Lj;E; \quad (27)$$

di mana j adalah jumlah foton tiap peluruhan foton atau fraksi peluruhan, sedangkan E adalah energi foton. Di dalam Tabel 1 dan Tabel 2 diberikan harga konstanta gamma, f dan E untuk beberapa isotop.

Instalasi sinar-X

Berkaitan dengan perisai radiasi instalasi sinar-X ini dikenal adanya perisai primer dan sekunder. Perisai primer adalah materi yang digunakan untuk mengurangi radiasi pada arah yang langsung berhadapan dengan sumber pemancar sinar-X, sedangkan perisai

sekunder adalah yang sejajar dengan arah radiasi utama. Untuk memperjelas hal ini Gambar 7 diberikan.

Perisai Primer

National Council on Radiological Protection and Measurement (NCRP) memberikasikan sebuah metode gratis untuk menentukan tebal perisai primer dan sekunder.

Tebal perisai primer ditentukan dari grafik berdasarkan nilai K yang merupakan jumlah Roentgen per mili-Ampere-menit-minggu pada jarak 1m yang diberikan dengan persamaan berikut,

$$K = \frac{P \cdot \langle \rangle}{WUT} \quad (28)$$

di mana

P = dosis radiasi yang diizinkan,

dalam 1 minggu ($0,1\text{R/minggu}$ untuk

daerah terkontrol, $0,01\text{R/minggu}$

untuk daerah tidak terkontrol)

d_p = jarak dari fokus sumber

W = beban kerja dalam

mA-menit/minggu

U = faktor pemanfaatan

T = faktor penghunian (lihat Tabel 3)

Setelah nilai K diperoleh, maka tebal perisai primer dapat ditentukan dengan menggunakan Gambar 8-12.

Perisai Sekunder untuk Radiasi Bocor

Perisai sekunder ditentukan berdasarkan nilai faktor transmisi B yang dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$B = \frac{P \cdot d_{sec}^2 \cdot 60 \cdot I}{WT} \quad (29)$$

di sini I dalam mili-Ampere, sedangkan notasi lain seperti pada persamaan (28).

Setelah nilai B diketahui, tebal perisai dapat dihitung persamaan berikut,

$$B = \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (30)$$

$$n = t \text{sec} / hvt$$

Nilai hvt untuk beberapa materi diberikan pada Tabel 4.

Perisai Sekunder untuk Radiasi Terhambur

Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung perisai ini adalah sebagai berikut,

$$K = \frac{P \cdot d_{\text{sec}}^2 \cdot d_{\text{sea}}^2 \cdot 400}{a \cdot W \cdot T \cdot F \cdot j} \quad (31)$$

di sini d_{sea} adalah jarak antara sumber dengan penghambur, a adalah fraksi radiasi terhambur (Tabel 5), F adalah luas penghambur, j adalah suatu konstanta berdasarkan tegangan maksimum pesawat (Tabel 6).

Penutup

Di atas telah dibahas perhitungan perisai untuk radiasi alpha, beta, gamma dan sinar-X. Dan dari pembahasan dapat diringkaskan beberapa hal sebagai berikut:

1. perhitungan perisai untuk radiasi alpha, beta, gamma maupun sinar-X dapat dilakukan dengan menggunakan

persamaan atenuasi atau rumus empiris seperti yang dijelaskan di atas;

2. untuk menentukan ketebalan perisai perlu diperhatikan jenis dan energi radiasi, tipe interaksi radiasi dengan materi perisai dan jenis perisai;
3. karena alpha merupakan partikel yang berat, maka jangkauannya di udara cukup pendek dan karena itu partikel ini tidak begitu berbahaya dari segi proteksi radiasi ekstema;
4. massa partikel beta lebih kecil daripada alpha dan karena itu jangkauannya lebih jauh daripada partikel alpha. Untuk menentukan ketebalan perisai radiasi gamma perlu juga diperhatikan efek brehmstrahlung, selain atenuasi radiasi dalam materi. Oleh karena fraksi energi radiasi beta yang dapat diubah menjadi radiasi sinar-X melalui proses brehmstrahlung ini berbanding lurus dengan nomor atom (Z) materi perisai, maka untuk perisai radiasi beta ini digunakan materi dengan Z kecil (biasanya ZS13);
5. radiasi gamma atau sinar-X merupakan radiasi elektromagnetis, maka jangkauannya lebih jauh daripada alpha maupun beta. Pengurangan radiasi gamma maupun sinar-X terjadi melalui interaksi utamanya dengan materi: efek fotolistrik, hamburan Compton dan produksi pasangan. Karena tampang lintang fotolistrik berbanding lurus dengan Z⁵, produksi pasangan

- sebanding dengan Z^2 , sedangkan Compton tidak bergantung kepada nilai Z , maka materi dengan Z besar lebih cocok digunakan sebagai perisai gamma atau sinar-X;
6. perisai radiasi untuk instalasi sinar-X bergantung kepada beban kerja, faktor pemanfaatan, faktor penghunian, jarak dari fokus, sudut hamburan, dan tegangan maksimum pesawat sinar-X.
 2. Herman Cember, "Introduction to Health Physics", 2nded., McGraw-Hill, Inc., 1992
 3. Takao Tojo, "Fisika Radiasi" (dalam bahasa Jepang), JAERI, 1990.
 4. NCRP Report #49, "Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to IOMe V
 5. IAEA TECDOC 691, 1991
 6. RD.Evans, "The Atomic Nucleus", McGraw-Hill Book, Co., Inc., 1955

Referensi

1. Irving Kaplan, "Nuclear Physics", 2nd ed., Addison-Wesley Pubs. Co., 1979

Tabel II Harga konstanta gamma untuk beberapa isotop [1]

Isotop	Γ , R-m ² /Ci-iam
Cs-137	0,33
Cr-51	0,016
Co-60	1,32
Au-198	0,23
I-125	0,07
I-131	0,22
Ir-192	0,48
Hg-203	0,13
K-42	0,14
Ra-226	0,825
Na-22	1,20
Na-24	1,84
Zn-65	0,27

Tabel 2 Energi dan fraksi gamma untuk beberapa isotop [5]

Isotop	Waktu paruh	Ei, keY	fi
Cs-137	30,07 th	661,657	0,851
Co-60	5,2714 th	1173,228	0,99857
		1332,49	0,99983
Au-198	2,69517 hr	411,80205	0,956
I-125	59408 hr	35,5	0,0658
Hg-203	46,621 hr	279,194	0,8148
Na-22	2,6019 th	1274,537	0,99935
Na-24	14,959 jam	1368,625	0,999936
		2754,007	0,99855

Tabel 13 Faktor Penghunan T [2],[4]

Pemakaian penuh T=1	Ruang kontrol, bangsal, ruang kerja, ruang gelap, koridor yang cukup luas, ruang tunggu, ruang istirahat yang digunakan oleh personil yang karena pekerjaannya terkena paparan, ruang bermain anak-anak, tempat tinggal.
Pemakaian sebagian T=1/4	Koridor sempit, ruang serbaguna, ruang istirahat yang tidak secara rutin digunakan oleh personil yang karena pekerjaannya terkena paparan, elevator yang menggunakan operator, dan tempat parkir.
Pemakaian kadangkala T=1/6	Tangga, elevator, daerah luar yang hanya digunakan oleh pejalan kaki atau lalu lintas kendaraan, kamar yang sempit, toilet yang tidak digunakan rutin oleh personil yang karena pekerjaannya terkena penyinaran.

Tabel 4 Nilai hvt untuk beberapa materi [2],[4]

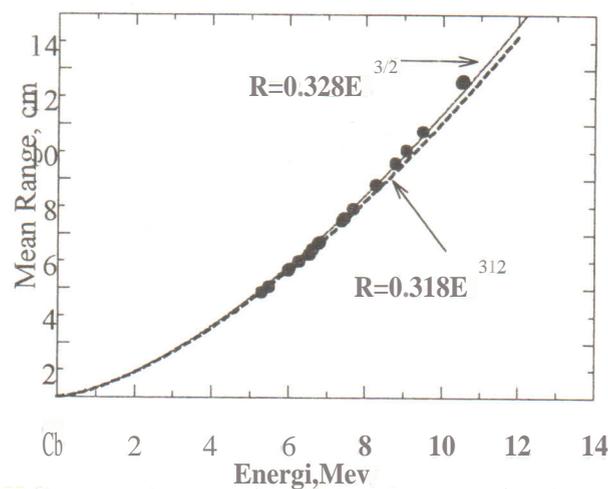
Tegangan Maksimum, kV	Bahan Perisai					
	Timbal, mm		Beton, em		Besi, em	
	HVT	TVT	HVT	TVT	HVT	TVT
50	0,06	0,17	0,43	1,5		
70	0,17	0,52	0,84	2,8		
100	0,27	0,88	1,6	5,3		
125	0,28	0,93	2,0	6,6		
150	0,30	0,99	2,24	7,4		
200	0,52	1,7	2,5	8,4		
250	0,88	2,9	2,8	9,4		
300	1,47	4,8	3,1	10,4		
400	2,5	8,3	3,3	10,9		
500	3,6	11,9	3,6	11,7		
1000	7,9	26	4,4	14,7		
2000	12,5	42	6,4	21		
3000	14,5	48,5	7,4	24,5		
4000	16	53	8,8	29,2	2,7	9,1
6000	16,9	56	10,4	34,5	3,0	9,9
8000	16,9	56	11,4	37,8	3,1	10,3
10000	16,6	55	11,9	39,6	3,2	10,5
Cs-127	6,5	21,6	4,8	15,7	1,6	5,3
Co-60	12	40	6,2	20,6	2,1	6,9
Radium	16,6	55	6,9	23,4	2,2	7,4

Tabel 5 Fraksi radiasi terhambur a [2],[4]

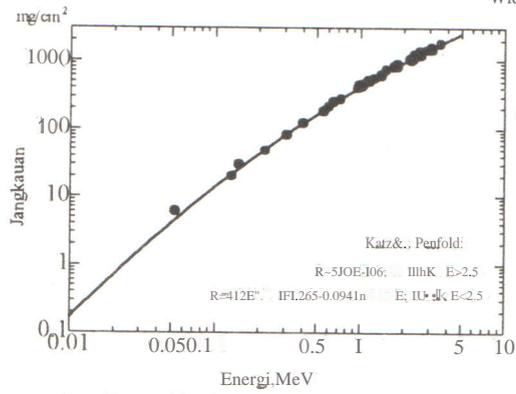
Sumber	Sudut Hamburan (dari pusat sinar)					
	30	45	60	90	120	135
Sinar-X						
50 kV	0,0005	0,0002	0,00025	0,00035	0,0008	0,0010
70 kV	0,00065	0,00035	0,00035	0,0005	0,0010	0,0013
100 kV	0,0015	0,0012	0,0012	0,0013	0,0020	0,0022
125 kV	0,0018	0,0015	0,0015	0,0015	0,0023	0,0025
150 kV	0,0020	0,0016	0,0016	0,0016	0,0024	0,0026
200 kV	0,0024	0,0020	0,0019	0,0019	0,0027	0,0028
250 kV	0,0025	0,0021	0,0019	0,0019	0,0027	0,0028
300 kV	0,0026	0,0022	0,0020	0,0019	0,0026	0,0028
4 MV	-	0,0027	-	-	-	-
6MV	0,007	0,0018	0,0011	0,0006	-	0,0004
Sinar Gamma						
Cs-137	0,0065	0,0050	0,0041	0,0028		0,0019
Co-60	0,0060	0,0036	0,0023	0,0009		0,0006

Tabel6 Nilai f [2],[4]

Tegangan maksimum, kV	f
≤ 500	1
1000	20
2000	300
3000	700

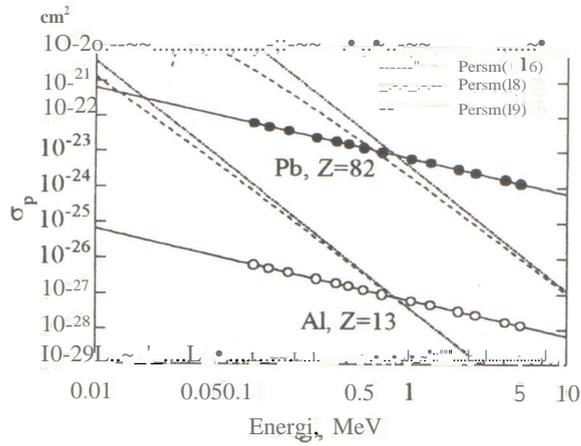


Gambar 1 Hubungan antara energi partikel alpha dengan jangkauan di udara

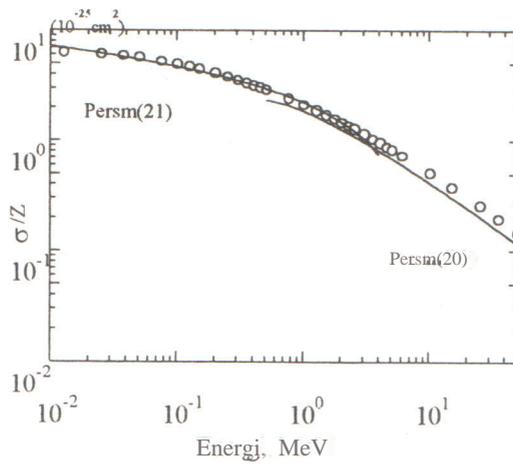


(data:Katz and Penfold:Revs.Modern Phys. 24, 28 (1952»)

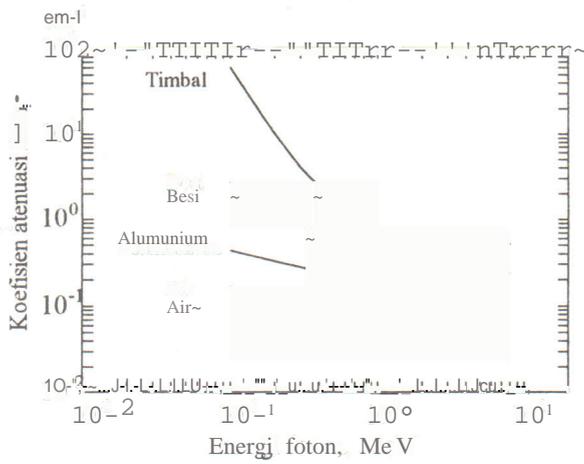
Gambar 2 Hubungan antara energi partikel beta dengan jangkauan



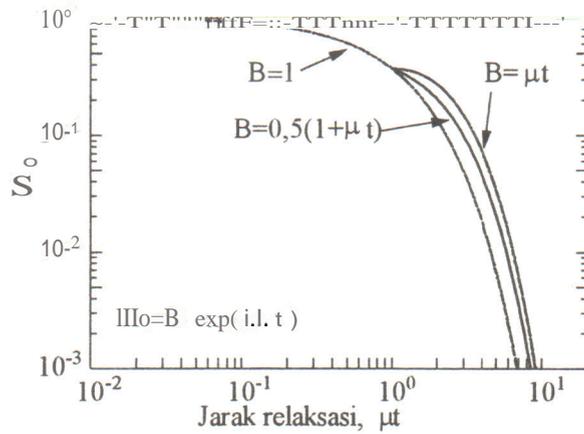
Gambar 3 Tampang lintang fotolistrik



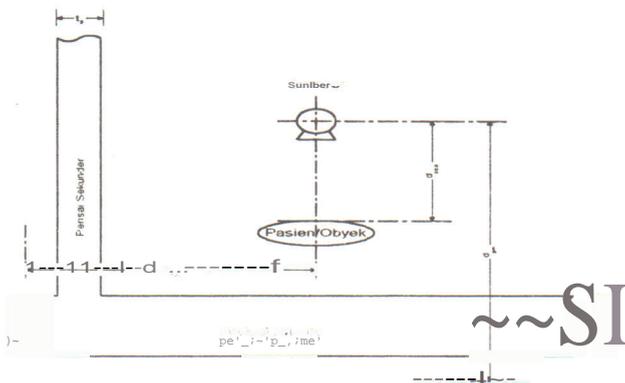
Gambar 4 Tampang lintang efek Compton



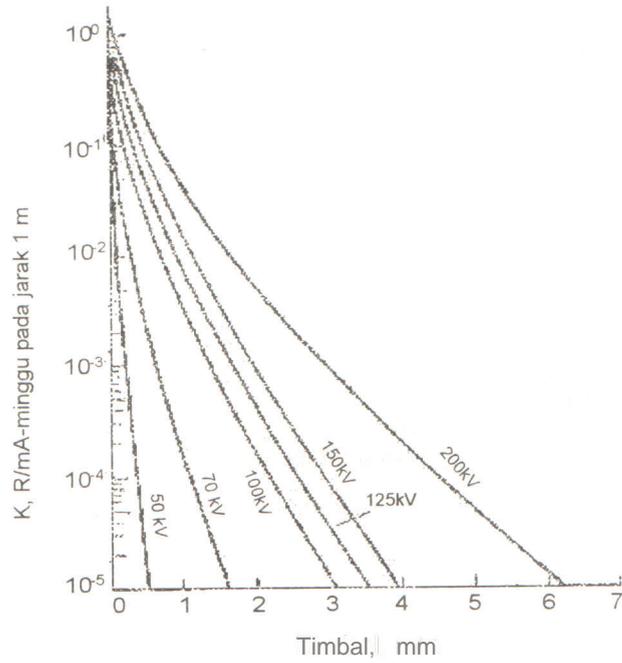
Gambar 5 Koefisien atenuasi linier untuk beberapa materi



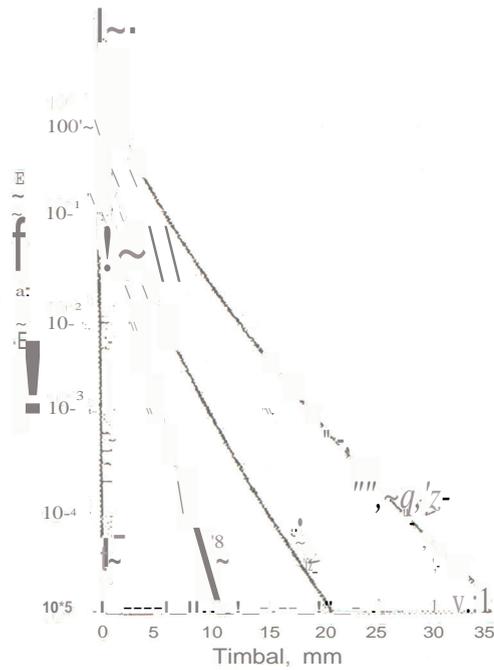
Gambar 6 Hubungan antara fraksi atenuasi, jarak relaksasi dan faktor build-up



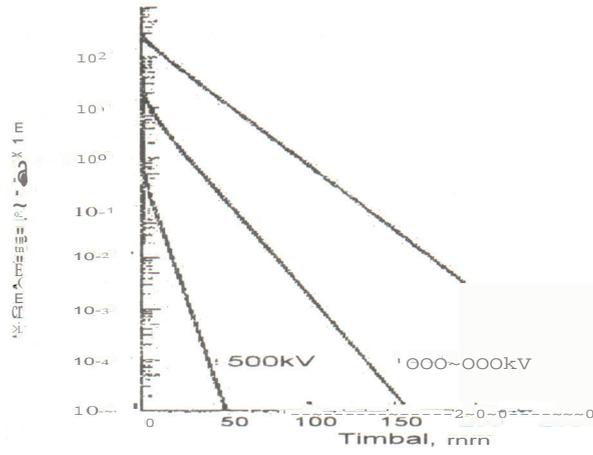
Gambar 7 Konsepsi perisai primer dan sekunder



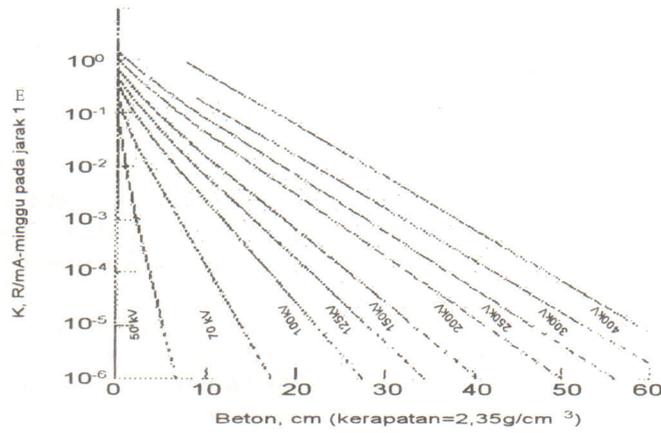
Gambar 8 Nilai K untuk Timbal dengan tegangan maksimum : 200KV



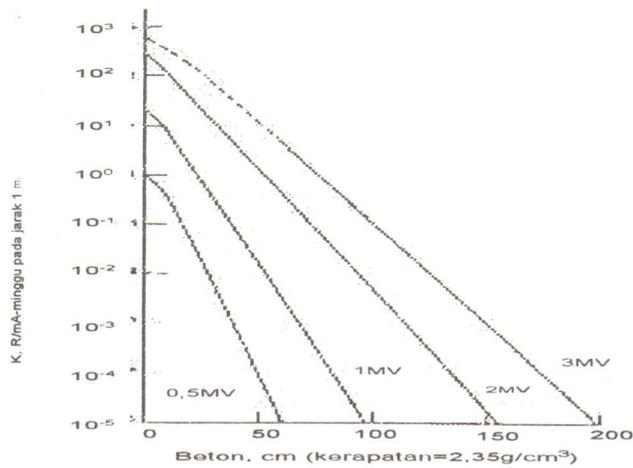
Gambar 9 Nilai K untuk Timbal dengan tegangan maksimum 250 kV - 400kV



Gambar. 10 Nilai K untuk Timbal dengan tegangan maksimum 500 kV - 2MY



Gambar. 11 Nilai K untuk beton dengan tegangan maksimum 35;40kV



Gambar. 12 Nilai K untuk beton dengan tegangan maksimum 500 kV-3 MY