

APLIKASI PENSILBARIS1.2 UNTUK DESAIN KESELAMATAN IRADIATOR GAMMA BATAN 500K

Pudjijanto MS

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN

e-mail: pudji_ms@batan.go.id

Diterima editor 3 Desember 2010

Disetujui untuk publikasi 28 Januari 2011

ABSTRAK

APLIKASI PENSILBARIS1.2 UNTUK DESAIN KESELAMATAN IRADIATOR GAMMA BATAN 500K. Aspek keselamatan penggunaan radiasi gamma, khususnya penggunaan iradiator gamma perlu ditekankan untuk menjamin keselamatan personil maupun keselamatan lingkungan. Keselamatan radiasi pekerja diperhitungkan pada saat fasilitas iradiasi beroperasi normal dan ketika sedang dilakukan bongkar-muat sumber radiasi dan perawatan/perbaikan fasilitas dengan sumber radiasi berada di dalam kolam penyimpanan atau di rak khusus penyimpan sumber. Jenis dan tebal dinding beton ruang papar yang sekaligus berfungsi sebagai perisai radiasi perlu dipertimbangkan, agar paparan radiasi di lingkungan fasilitas iradiator ini memenuhi kriteria keselamatan radiasi yang ditetapkan BAPETEN. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan PensilBaris1.2 dengan teknik integrasi kernel titik dan sebagai pembandingan digunakan program MCNP5 dengan teknik Monte Carlo. Fasilitas iradiator gamma inovatif yang akan didesain berdimensi panjang 13 m, lebar 6 m dan tinggi 4 m. Radiasi gamma bersumber dari 36~52 batang Cobalt-60 beraktivitas total 500 kCi yang disusun tegak berjajar yang berjarak sama dalam sepasang rak sejajar bertingkat dua dengan panjang 135 cm dan tinggi 100 cm. Jarak pisang antara sepasang rak sumber gamma ditetapkan 120 cm. Hasil perhitungan program PensilBaris1.2 untuk dinding beton dengan kerapatan $2,45 \text{ g/cm}^3$ berturut-turut memberikan 141,6; 164,4 dan 154,9 cm dan program MCNP5 berturut-turut memberikan ketebalan 145, 155 dan 140 cm. Perbedaan hasil dari kedua *tool* ini, selain disebabkan oleh teknik dan metode komputasi yang berbeda, disebabkan karena adanya perbedaan pustaka data tampang interaksi foton dengan materi dan faktor bangkit dosis yang digunakan. Hasil perhitungan menggunakan PensilBaris1.2 dengan kerapatan $2,35 \text{ g/cm}^3$ memberikan tebal dinding beton dalam arah memanjang, melebar dan meninggi berturut-turut 147,4; 170,7 dan 161,4 cm. Kedalaman benam minimal ujung atas sumber dari permukaan air kolam menggunakan PensilBaris1.2 sebesar 4,85 meter untuk laju dosis 0,25 mrem/jam dan 3,25 m untuk nilai batas 2,5 mrem/jam, sedangkan bila menggunakan MCNP5 memberikan harga yang tak begitu jauh berbeda. Berdasarkan hasil perhitungan ini telah dibuat desain dasar fasilitas iradiator gamma yang dapat dilanjutkan kedesain lengkap sehingga dapat diaplikasikan untuk kepentingan masyarakat.

Kata kunci: iradiator gamma, laju dosis radiasi, dosis radiasi total, keselamatan radiasi, perisai radiasi, PensilBaris, MCNP5.

ABSTRACT

SAFETY DESIGN OF THE BATAN 500K GAMMA IRRADIATOR USING PENSILBARIS1.2 CODE. The safety aspects of the gamma radiation application, especially in using of gamma irradiators is required to guarantee the personnel safety and environmental safety. The radiation safety of workers is reckoned in normal operation of the irradiation facility and in loading-unloading of radiation source and maintenance or repairing of this facility when radiation source inside the storage pool or in the depository racks. The type and thickness of concrete wall that serves as radiation shielding should be considered, so the radiation exposure in the environment fulfil with the radiation safety criteria established by BAPETEN. Calculation performed by using the PensilBaris1.2 computer code with a point kernel integration technique and as comparison

using MCNP5 code with the Monte Carlo techniques. The facility of innovative gamma irradiator has dimension of length, wide dan hight 13, 6 and 4 m, respectively and gamma sources emitted from 36~52 Cobalt-60 rods with 500 kCi total activities that are arranged in a pair of parallel 2-level rack in 135 cm long and 100 cm height. The results of calculation using PensilBaris1.2 give a thickness of 2.45 g/cm³ density concrete wall in length, wide and hight are 14.,6; 164.4 and 15.,6 cm, revectively. Similar analysis using MCNP5 but for 2.45 g/cm³ density concrete wall, giving the thickness of 145, 155 and 140 cm, resvectively. The difference results from both tools, other than due to the technical and computational methods are different, may be caused also by differences in the data library of the photon interaction cross-section to the matter and dose built-up factor used. Meanwhile, the result from PensilBaris1.2 using density of concrete wall 2.35 g/cm³ give the thickness of wall in length, wide and hight of 147.4; 170.7 and 161.4 cm, respectively. Minimum under water depth of the upper end of the source rack from the water surface using PensilBaris1.2 giving 4.85 m for 0.25 mrem/h and 3.25 m for the limit value 2.5 mrem/h dose rate, whereas using MCNP5 giving not so much significantly different values. Based on these calculations the basic design of gamma irradiator facility has been made and then it will be continued to detail design so after that it can be fabricated for operation

Key words: gamma irradiators, radiation dose rate, total radiation dose, radiation safety, radiation shielding, PensilBaris, MCNP5.

PENDAHULUAN

Persoalan mengenai perisai radiasi sebenarnya menyangkut sejumlah banyak fungsi. Maksud digunakannya perisai radiasi di lingkungan medan radiasi antara lain untuk mengurangi paparan radiasi pada orang yang berada di sekitar sumber radiasi tersebut. Perisai radiasi yang digunakan untuk maksud seperti ini disebut perisai biologis. Perisai radiasi di instalasi iradiator gamma digunakan untuk mengurangi intensitas insiden sinar- γ di lingkungan bangunan tersebut. Perisai yang sekaligus berfungsi sebagai dinding luar bangunan ini melindungi ruang papar- γ dari pemanasan lebih yang berasal dari serapan sinar- γ . Perisai semacam ini disebut perisai termal. Beberapa jenis perisai digunakan untuk melindungi peralatan / instrumentasi elektronika yang peka, yang tidak dapat berfungsi dengan baik dalam medan radiasi. Perisai semacam ini disebut perisai aparatus. Perisai radiasi yang akan dibahas dalam makalah ini mencakup ketiga fungsi tersebut di atas, tetapi analisis dan rekomendasinya cenderung lebih diutamakan dalam kaitannya dengan keselamatan radiasi terhadap jasad hidup, khususnya manusia [1, 2].

Di luar pembicaraan masalah reaktor dan akselerator, biasanya perisai radiasi hanya perlu untuk melindungi manusia terhadap radiasi sinar-X dan sinar- γ saja, bukan terhadap radiasi zarah alpha (α^+) dan zarah beta (β^-). Hal ini disebabkan jangkau zarah bermuatan (+/-) dalam bahan (materi) sangat pendek. Makalah ini hanya akan membahas satu masalah saja, yaitu mengenai perisai biologi dan dampak radiologi dari radiasi sinar- γ di instalasi iradiator gamma. Dalam kasus ini, pokok permasalahannya adalah menentukan tebal dan atau komposisi bahan perisai yang diperlukan untuk mengurangi laju dosis radiasi pada tingkat yang ditentukan sebelumnya serta agihan laju dosisnya di ruang pemaparan.

Kemampuan sinar- γ berenergi tinggi untuk menerobos masuk ke dalam materi memungkinkan dapat dimanfaatkan untuk tujuan pasteurisasi dan sterilisasi melalui proses ionisasi atom-atom materi. Karena itu, radiasi sinar- γ disebut juga radiasi pengion. Ion-ion bermuatan hasil proses ionisasi dapat merusak molekul-molekul sel, memutus ikatan DNA, dan membunuh atau membuat ketakmampuan bakteri pathogen dan

serangga untuk bereplikasi. Sebagai radiasi pengion, sinar- γ telah banyak digunakan untuk mengulur masa simpan dan mensterilisasi berbagai produk industri dan pertanian di berbagai negara, seperti Amerika dan Jepang, termasuk di Indonesia [3].

Sebagai teladan, sebuah iradiator gamma baru dengan luas ruang papir 76 m² juga menggunakan sumber gamma Co-60 beraktivitas 1 MCi kini sedang dibangun di Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) Brasilia, dengan desain yang revolusioner. Teknologi yang dikembangkan untuk fasilitas ini terdiri dari sistem transport kotak jinjing bersinambung, terdiri dari kubah beton tunggal, dengan sistem transportasi pemasukan dan pengeluaran produk secara otomatis menggunakan pintu berputar yang terpadu dengan perisai radiasi menggantikan konfigurasi labirin tradisional yang berkeluk-luk [4, 5].

Kecenderungan jumlah industri pengguna iradiator- γ meningkat terus dari waktu ke waktu. Hal ini tidak terlepas dari peran BATAN dalam mempromosikan teknologi iradiasi ke masyarakat industri dan keberterimaan industri dalam memanfaatkan teknologi iradiasi. Oleh sebab itu, untuk dapat memberikan layanan iradiasi terhadap berbagai komoditas industri di setiap daerah di Indonesia, cara yang paling tepat adalah pada beberapa daerah hendaknya (diharapkan) memiliki fasilitas iradiasi gamma. Untuk itu, perlu dirancang sebuah iradiator- γ yang memiliki nilai ekonomis tinggi dan memberikan keuntungan bagi para industri baik di daerah maupun di pusat.

Dalam makalah ini, perhitungan laju dosis- γ di sekitar sumber radiasi dilakukan secara analitis menggunakan PensilBaris1.2, sebuah program komputer produk lokal yang ditulis menggunakan bahasa pemrograman saintifik FORTRAN-77 dan dihimpun serta dipadu dengan *compiler/linker* Compaq Visual Fortran Versi 6.5 [6]. PensilBaris1.2 (versi-1 revisi-2) identik dengan PensilBaris1.1 yang telah direvisi/dikembangkan agar hasil keluaran opsionalnya bisa diolah dengan Excel untuk tujuan penggambaran laju isodosis radiasi. Dengan sumber radiasi dimodelkan sebagai sejumlah banyak batang pensil sumber yang berdiri tegak lurus dan berbaris sejajar. Seperti halnya program yang telah dibuat untuk menganalisis laju dosis iradiator gamma menggunakan elemen bakar nuklir bekas RSG-GAS dengan konfigurasi sejajar,[7] PensilBaris1.2 pun menggunakan metode analitik numerik integral kernel titik. Untuk model sumber iradiator- γ yang berupa *multiple source* dan *semi complex dimension*, sehingga pendekatan secara analitis tidak tepat untuk digunakan, maka penyelesaiannya dikerjakan dengan menggunakan metoda pembangkitan bilangan acak (rambang, random) dengan teknik MC (Monte Carlo) yang diselesaikan dengan menggunakan paket program MCNP5 (Monte Carlo for Neutral Particle Version-5) [8]. Sebagai teladan, geometri iradiator gamma industrial "Gammacell 220" pernah disimulasi semirip mungkin untuk menghasilkan kembali *setup* eksperimental oleh Rodrigues dkk. menggunakan MCNP [9]. Metode MC ini adalah salah satu teknik atau cara penyelesaian masalah transport partikel netral (foton- γ) dengan melakukan simulasi sejarah jejak partikel, yaitu dengan cara mengikuti jejak partikel dari sejak pembentukan awal diikuti langkah demi langkah dalam medium yang telah didefinisikan sebelumnya sampai partikel itu lenyap keberadaannya dari sistem yang ditinjau. Dalam perhitungan pelemahan foton- γ dengan menggunakan metode MC, dataampang lintang interaksi mikroskopis setiap unsur untuk hamburan Compton (σ_C), serapan fotolistrik (σ_{pe}), dan bentukan pasangan ion (σ_{pp}) telah tersedia dalam memori pustaka paket programnya. Kebolehjadiannya berinteraksi dengan media disimulasi dengan bantuan pembangkit bilangan acak (*random number generator*), setelah densitas materi diketahui dari data masukan programnya. Cacah foton- γ yang melewati suatu lokasi tertentu dihitung (*scored*), jumlah cacah foton- γ ini merupakan fluks foton- γ pada titik yang diobservasi [8]. Lingkup dan rencana kegiatan penelitian ini difokuskan pada

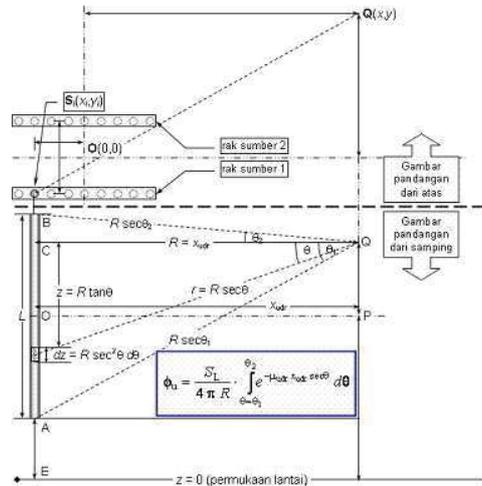
aspek keselamatan fasilitas iradiator- γ dengan sumber radiasi Cobalt-60 dengan aktivitas maksimum 0,5 juta curie (500 kCi) hanya untuk model kering saja, yaitu iradiasi dilakukan di dalam ruang papir berisi udara pernafasan dengan suhu dan tekanan normal ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 1\text{ atm}$), bukan atau tidak dilakukan ketika sumber- γ berada di dalam kolam air. Di dalam kolam air ini justru sumber- γ disimpan/diistirahatkan. Aspek keselamatan radiasi dari fasilitas ketika sumber- γ berada di dalam kolam air penyimpan hanya ditinjau untuk kedalaman minimal berapa dari permukaan air kolam sedemikian rupa sehingga dalam kondisi fasilitas tidak beroperasi, masih cukup aman bagi pekerja operator atau perawat fasilitas. Tahapan dan rencana kegiatan ini meliputi: pengumpulan bahan / studi pustaka termasuk spesifikasi sumber Cobalt-60, spesifikasi bahan perisai dan penentuan batas-batas keselamatan bagi pekerja dan lingkungan, penyiapan program PensilBaris1.2 [3] dan MCNP5 [4] untuk pelaksanaan perhitungan, dan penjalanan program dengan masukan data yang telah diperoleh sebelumnya.

TEORI

Fluks - γ

Telah disimpulkan penyajian formulasi matematis sederhana untuk fluks- γ tanpa tumbukan ϕ_u dan dengan tumbukan hamburan ϕ_b , dari sebuah sumber foton- γ monoenergetik berbentuk batangan tongkat di sembarang titik pengamatan yang masih dalam ruang yang sama dengan sumber- γ itu sendiri, yang volume ruang paparnya nisbi besar dan densitas material pelemah foton- γ (udara) dianggap seragam dan merata di seluruh pelosok elemen volumenya. Penjabaran formula matematika secara terinci diberikan dalam laporan terpisah mengingat adanya kendala jumlah halaman dalam penulisan makalah.

Gambar 1 menunjukkan skema prototipe sepenggal sumber garis dalam keadaan terpapar (terbuka) dengan posisi berdiri tegak lurus di udara pada suhu dan tekanan kamar kerja normal ($t = \sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = \sim 1\text{ atm}$) di sekitar putaran tengah sebuah ruang tertutup, katakanlah di dalam ruang papir iradiator- γ yang berdinding beton ringan biasa dengan rapat massa nominal pasaran sebesar $\rho_{\text{beton}} = 2,35\text{ g/cm}^3$ setebal x_{beton} (120~180) cm. Titik A di ujung tutup bagian bawah dari batang sumber berada pada aras setinggi z_{bot} (30~60) cm dari titik E di permukaan lantai dan titik O sebagai sentral sumber- γ batang berada pada jarak x_{udr} (200~1000) cm dari titik C di permukaan dinding bagian dalam terdekat dari ruang papir iradiator- γ .



Gambar 1. Sumber- γ isotropis untuk menghitung laju dosis di dalam ruang papir.

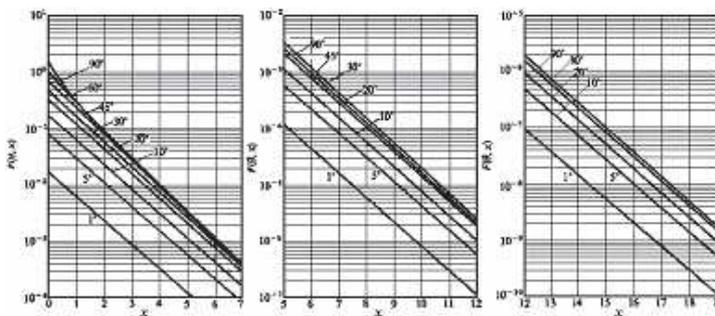
Jika aktivitas total sebatang sumber- γ dari ujung satu (A) hingga ke ujung lain (B) sepanjang L (cm) adalah S_T , dan jika aktivitas sumber batang ini dapat dikatakan homogen di seluruh volume yang dalam hal ini di sepanjang batang sehingga S_L merupakan aktivitas per satuan panjang, maka fluks- γ tanpa tumbukan di titik P dapat diformulasikan sebagai:

$$\phi_u = \frac{S_L}{4 \pi R} \cdot \{F(\theta_1, \mu R) + F(\theta_2, \mu R)\} \quad (1)$$

dan fluks- γ dengan tumbukan ϕ_b diberikan oleh persamaan:

$$\begin{aligned} \phi_b &= \frac{S_L}{4 \pi R} \cdot \sum_{i=1}^2 \left\{ A_i \int_{\varphi=-\theta_1}^{+\theta_2} e^{-(1+\alpha_i) \cdot \mu R \sec \varphi} d\varphi \right\} \\ &= \frac{S_L}{4 \pi R} \cdot \sum_{i=1}^2 \left\{ A_i [F\{\theta_1, (1 + \alpha_i) \cdot \mu R\} + F\{\theta_2, (1 + \alpha_i) \cdot \mu R\}] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

Gambar 2 menunjukkan integral Sievert $F(\theta, x)$ sebagai fungsi dari $x = \mu \cdot R$ untuk beberapa harga dari θ .



Gambar 2. Fungsi integral Secant: $\text{Seci}(\theta, x)$ atau integral Sievert: $F(\theta, x)$.

Fungsi integral Secant atau *integral Sievert* adalah sebuah fungsi dengan 2 (dua) peubah, yaitu θ dan x , yang didefinisikan sebagai:

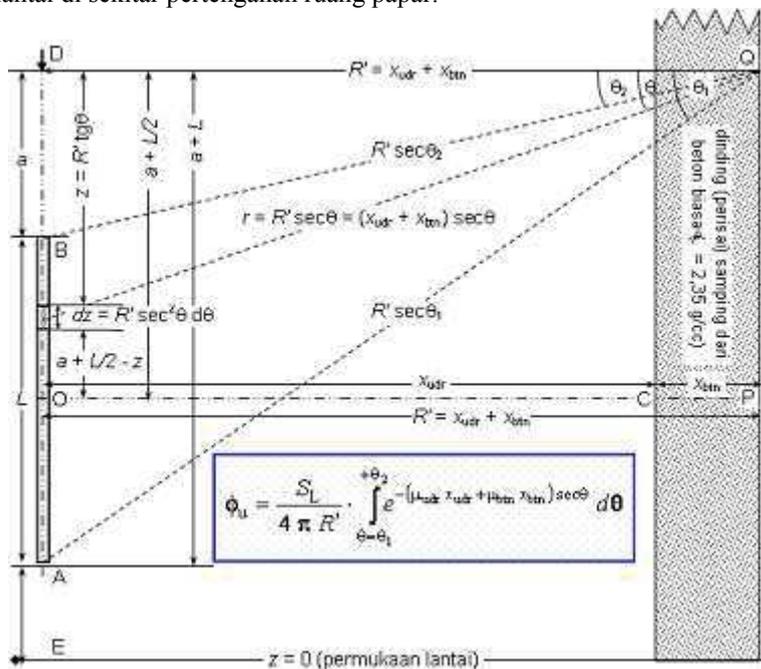
$$F(\theta, x) = \int_{\varphi=0}^{\theta} e^{-x \sec \varphi} d\varphi \tag{3}$$

dengan,

$\varphi \equiv$ peubah “boneka” dari sudut bidang pandang θ , [radial];

$\theta \equiv$ sudut bidang pandang yang dipertahankan pada atau dibatasi oleh harga-harga yang lebih kecil daripada atau kurang dari $\pi/2$.

Gambar 3 menunjukkan skema prototipe sepenggal sumber garis pemancar foton- γ dalam instalasi fasilitas iradiator- γ ditinjau dari luar dinding bangunan. Berikut di bawah ini disajikan besarnya fluks- γ tanpa tumbukan ϕ_u dan dengan tumbukan hamburan ϕ_b dalam bentuk formulasi matematika sederhana dari sebuah sumber foton- γ di sembarang titik pengamatan di atas permukaan bidang dinding luar yang sejajar dengan sumbu sumber. Dalam hal ini, dinding ruang iradiator- γ yang sekaligus berfungsi sebagai perisai radiasi eksternal ini bentuknya berupa semacam balok berongga dengan keempat permukaan dinding luar-dalamnya sejajar dengan sumber batang yang berdiri tegak lurus permukaan lantai di sekitar pertengahan ruang papir.



Gambar 3. Sumber- γ untuk menentukan laju dosis di luar dinding

Karena R' adalah jarak terdekat antara sumbu batang sumber- γ dan titik observasi Q_{out} yang terletak di bidang permukaan dinding luar ruang iradiator- γ yang sejajar batang sumber, maka fluks- γ tanpa tumbukan di titik Q_{out} dapat disajikan sebagai

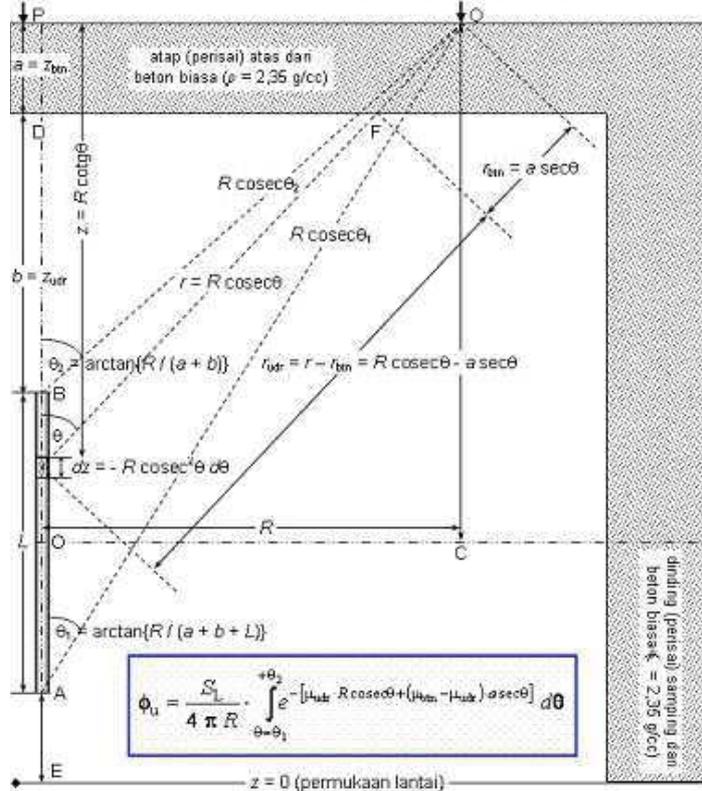
$$\begin{aligned} \phi_u &= \frac{S_L}{4 \pi R'} \cdot \{F(\theta_1, \mu' R') - F(\theta_2, \mu' R')\} \\ &= \frac{S_L}{4 \pi R'} \cdot \{F(\theta_1, \mu_{udr} x_{udr} + \mu_{btn} x_{btn}) - F(\theta_2, \mu_{udr} x_{udr} + \mu_{btn} x_{btn})\} \end{aligned} \quad (4)$$

dan fluks- γ terbangkit ϕ_b diberikan oleh persamaan:

$$\begin{aligned} \phi_b &= \frac{S_L}{4 \pi R'} \cdot \prod_{j=1}^2 \left[\sum_{i=1}^2 \left\{ A_{i,j} \cdot \int_{\varphi=-\theta_1}^{+\theta_2} e^{-[(1+\alpha_{i,j})\mu_{i,j} X_j] \sec \varphi} d\varphi \right\} \right] \\ &= \frac{S_L}{4 \pi R'} \cdot \prod_{j=1}^2 \left[\sum_{i=1}^2 \left\{ A_{i,j} \cdot [F\{\theta_1, (1+\alpha_{i,j}) \cdot \mu_{i,j} X_j\} + F\{\theta_2, (1+\alpha_{i,j}) \cdot \mu_{i,j} X_j\}] \right\} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

dimana indeks $i = 1$ s.d. 2 seperti sebelumnya adalah menyatakan nomor urut parameter faktor bangkit versi Taylor dan indeks $j = 1$ s.d. 2 adalah menyatakan jenis bahan perisai, yaitu berturut-turut: 1 untuk udara dan 2 untuk beton.

Gambar 4 menunjukkan skema prototipe sumber garis pemancar foton- γ dalam instalasi fasilitas iradiator- γ ditinjau dari luar atap bangunan gedung.



Gambar 4. Sumber- γ isotropis untuk menentukan laju dosis di atas atap

Kepanjangan dari sumbu sumber batang AB ke atas akan menembus atap beton setebal z_{btn} di titik D di permukaan bagian dalam dan di titik P di permukaan luar.

Selanjutnya hendak dirumuskan fluks- γ tanpa (ϕ_u) dan dengan (ϕ_b) tumbukan di titik Q yang terletak di permukaan luar atap beton pada jarak $R = PQ$.

Jika di sini ada S_L foton- γ yang dipancarkan secara isotropis per satuan panjang dari sumber, maka fluks- γ tanpa tumbukan di titik tersebut adalah:

$$\phi_u = \frac{S_L}{4 \pi R} \cdot \bar{f}(\theta_1, \theta_2, \mu_{udr}, R) \cdot \{F(\theta_2, (\mu_{bmn} - \mu_{udr}) \cdot a) - F(\theta_1, (\mu_{bmn} - \mu_{udr}) \cdot a)\} \quad (6)$$

dengan faktor koreksi rerata

$$\bar{f}(\theta_1, \theta_2, \mu_{udr}, R) = \frac{F(\frac{\pi}{2} - \theta_1, \mu_{udr} R) - F(\frac{\pi}{2} - \theta_2, \mu_{udr} R)}{\theta_2 - \theta_1} \quad (7)$$

Pada umumnya, $\bar{f}(\theta_1, \theta_2, \mu_{udr}, R) \approx 1$ dan $\mu_{bmn} - \mu_{udr} \approx \mu_{bmn}$ sehingga persamaan (6) menjadi:

$$\phi_u = \frac{S_L}{4 \pi R} \cdot \{F(\theta_2, \mu a) - F(\theta_1, \mu a)\} \quad (8)$$

Dengan demikian fluks terbangkit di atas atap ruang iradiator- γ dapat dirumuskan oleh:

$$\phi_b = \frac{S_L}{4 \pi R} \cdot \sum_{i=1}^2 \langle A_i \cdot [F\{\theta_2, (1 + \alpha_i) \cdot \mu a\} - F\{\theta_1, (1 + \alpha_i) \cdot \mu a\}] \rangle \quad (9)$$

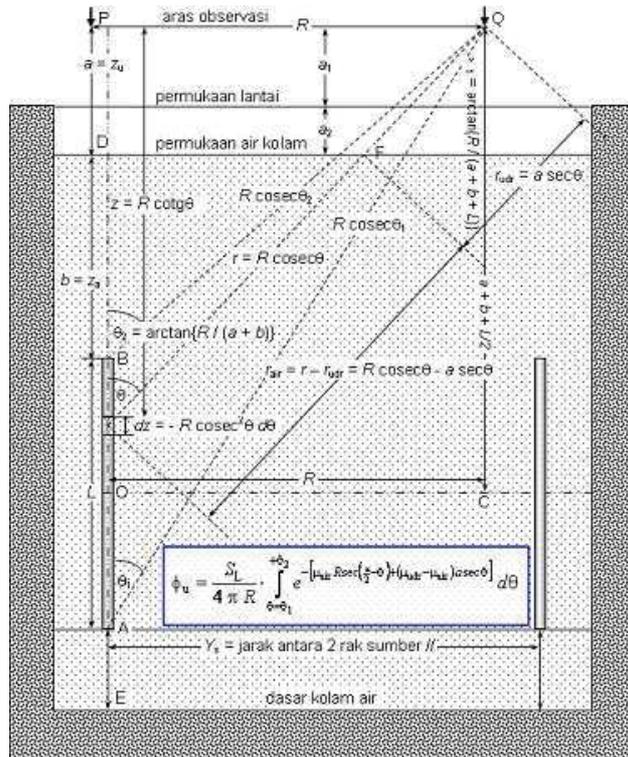
Gambar 5 melukiskan keadaan kedua pasang rak sumber sejajar ketika berada di dalam kolam penyimpanan. Jika di sini ada S_L foton- γ yang dipancarkan secara isotropis per satuan panjang dari sumber, maka fluks- γ tanpa tumbukan di titik tersebut adalah:

$$\phi_u = \frac{S_L}{4 \pi R} \cdot \{F(\theta_2, \mu a) - F(\theta_1, \mu a)\} \quad (10)$$

dan fluks terbangkit di atas kolam penyimpan sumber - γ dapat dirumuskan oleh:

$$\phi_b = \frac{S_L}{4 \pi R} \cdot \sum_{i=1}^2 \langle A_i \cdot [F\{\theta_2, (1 + \alpha_i) \cdot \mu a\} - F\{\theta_1, (1 + \alpha_i) \cdot \mu a\}] \rangle \quad (11)$$

Selanjutnya, dengan diketahuinya fluks gayut energi baik tanpa (ϕ_u) atau dengan (ϕ_b) tumbukan hamburan di berbagai titik pengamatan maka laju dosis di titik tersebut dan tebal dinding samping, tebal atap dan kedalaman bagian atas sumber dari permukaan air dapat ditentukan nilainya.



Gambar 5. Sumber- γ isotropis untuk menentukan laju dosis kedalaman kolam penyimpanan.

Laju Dosis dan Total Dosis- γ

Perhitungan dosis terserap (D) dan laju dosis (ter)serap (\dot{D}) adalah mirip seperti pada perhitungan paparan (X) dan laju paparan (\dot{X}). Dosis terserap diukur dalam satuan rad yang sama dengan serapan 100 erg tenaga sinar- γ per gram jaringan lunak atau jaringan biologis (*tissue*).

Dalam satuan yang lebih sesuai,

$$1 \text{ rad} = (100 \text{ erg/g}) \text{ per } (1,6021 \times 10^{-6} \text{ erg/MeV}) = 6,25 \times 10^7 \text{ MeV/g} \quad (12)$$

Laju serapan sinar- γ oleh jaringan lunak adalah:

$$\dot{D} = \phi_\gamma \cdot E_\gamma \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{tis}} \frac{\text{MeV}}{\text{gram} \cdot \text{detik}} \quad (13)$$

dengan,

ϕ_γ \equiv fluks atau intensitas sinar- γ , [foton- γ /($\text{cm}^2 \cdot \text{det}$)];

E_γ \equiv tenaga sinar- γ , [MeV];

$(\mu_a/\rho)_{\text{tis}}$ \equiv koefisien serapan massa dari *tissue* pada tenaga E_γ , [cm^2/gram].

Dengan mensubstitusikan persamaan (12), maka persamaan (13) menjadi:

$$\begin{aligned}
 \dot{D} &= \frac{1}{6,25 \times 10^7} \cdot \phi_\gamma \cdot E_\gamma \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{tis}} \frac{\text{rad}}{\text{detik}} \\
 &= 1,6021 \times 10^{-8} \cdot 3,6 \times 10^6 \phi_\gamma \cdot E_\gamma \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{tis}} \frac{\text{mrad}}{\text{jam}} \\
 &= 0,0576 \phi_\gamma \cdot E_\gamma \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{tis}} \frac{\text{mrad}}{\text{jam}}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Karena agihan (distribusi) laju dosis- γ ini dipastikan bergayut pada posisi titik observasi $Q(x,y)$ di dalam ruang papir iradiator- γ , sedemikian sehingga nilainya saling beda di sembarang tempat titik observasi tersebut berada, maka benda sasaran kerja yang bergerak lambat dengan kecepatan v konstan selama berada di ruang papir sejak ia masuk ($t = 0$) sampai ia keluar ($t = t_{\text{irad}}$), akan menerima dosis radiasi total D sebesar:

$$D = \int_{t=0}^{t_{\text{irad}}} \dot{D} dt = \frac{1}{v} \iint_{x,y} \dot{D}(x,y) \cdot \frac{x dx + y dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tag{15}$$

Semua formula diatas digunakan untuk mendesain iradiator gamma yang sudah dibuat dalam bentuk program bernama PensilBaris1.2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan tebal minimum dinding beton fasilitas iradiator- γ BATAN 500K arah horisontal (mendatar) dan tebal minimum atap beton arah vertikal (tegak) serta kedalaman benam minimum sumber- γ batang dalam kolam penyimpan dilakukan dengan menggunakan dua program komputer PensilBaris1.2. Program PensilBaris1.2 menggunakan metode metode analitik kemudian divalidasi dengan program MCNP5 berdasar metode random. Hal ini sangat penting karena dibutuhkan hasil yang sangat teliti karena menyangkut masalah keselamatan radiasi personal. Kedua program menggunakan data rapat massa udara, rapat massa air dan kuat sumber- γ total yang sama, yaitu berturut-turut $0,001293 \text{ g/cm}^3$, $0,9993 \text{ g/cm}^3$ dan $36 \sim 52$ batang sumber- γ Co-60 [10] beraktivitas total 500 kCi. Data koefisien pelemahan foton- γ yang tersedia untuk beton tidak menyebutkan komposisi bahan yang mencakup persen berat unsur yang terkandung di dalamnya, melainkan hanya menyajikan rapat massanya saja. Oleh sebab itu, untuk rapat massa beton yang dikehendaki berbeda dengan nilai nominalnya, disiasati dengan cara sederhana yaitu menggandakan nilai $(\mu/\rho)_{\text{nominal}}$ dengan ρ_{opsional} . Manakala dalam praktek pembangunan kelak ada kesulitan untuk mencapai rapat massa yang disyaratkan, hendaknya bisa dikompromi/dikompensasi dengan cara menambah ketebalan dinding sejauh laju dosis serap maksimal yang disyaratkan tidak terlampaui.

Hasil perhitungan laju dosis tertinggi di pusat permukaan luasan dinding dan atap sisi sebelah luar dari fasilitas iradiator- γ sebagai fungsi ketebalan beton dengan $\rho = 2,35$ dan $2,45 \text{ g/cm}^3$ menggunakan program PensilBaris1.2 dengan pusat rak sumber gamma berada pada ketinggian 100 cm dari lantai ruang papir diberikan dalam Tabel 1.

Dengan teknik iterasi secara manual, tebal dinding ruang papir dalam arah sejajar sumbu-x dan sumbu-y serta tebal atap dalam arah sejajar sumbu-z untuk kondisi laju dosis bagi pekerja radiasi dan orang awam menggunakan PensilBaris1.2 dan MCNP5 diberikan dalam Tabel 2. Perhitungan dengan PensilBaris1.2 dan MCNP5 dengan kerapatan $2,45 \text{ g/cm}^3$ tidak terdapat perbedaan yang signifikan. Dalam hal program

PinsiBaris1.2 selanjutnya akan digunakan untuk perhitungan iradiator gamma karena program MCNP5 pemodelannya sangat sulit dan waktu komputasi yang lama untuk mendapatkan ralat yang kecil. Nilai batas laju dosis yang digunakan dalam perhitungan ini bagi pekerja radiasi adalah 2,5 mrem/jam sementara nilai dosis untuk masyarakat umum adalah 0,25 mrem/ sesuai aturan keselamatan radiasi. Jika menggunakan beton dengan kerapatan 2,45 g/cm³ diperoleh tebal dalam arah-x ≥ 141,6 cm, arah-y ≥ 164,4 cm untuk laju dosis ≤ 0,25 mrem/jam dan tebal atap ≥ 154,9 cm untuk laju dosis ≤ 2,5 mrem/jam atau ≥ 172,6 cm untuk laju dosis ≤ 0,25 mrem/jam.

Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan kerapatan 2,35 g/cm³ karena dengan kerapatan sering digunakan dalam desain radiator dan untuk melihat pengaruh penurunan kerapatan dengan tebal dinding radiator gamma. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tebal dinding beton berdensitas 2,35 g/cm³ dalam arah-x ≥ 147,4 cm, arah-y ≥ 170,7 cm untuk menahan laju dosis ≤ 0,25 mrem/jam dan tebal atap dalam arah-z ≥ 161,4 cm untuk laju dosis ≤ 2,5 mrem/jam atau ≥ 179,8 cm untuk laju dosis ≤ 0,25 mrem/jam. Hasil perhitungan kedalaman benam rak sumber untuk dua kondisi laju dosis diberikan dalam Tabel 3. Berdasarkan hasil perhitungan dengan PinsiBaris 1.2 kedalaman benam rak dari muka air, untuk $\dot{D} \leq 2,50$ mrem/jam adalah 325 cm sementara kedalaman benam rak dari muka air, untuk $\dot{D} \leq 0,25$ mrem/jam. Untuk dalam mendesain kedalaman radiator gama kedalaman lantai dasar kolam dibuat sedalam 500 cm sehingga sangat aman bagi masyarakat.

Tabel 1. Laju dosis radiasi di pusat permukaan luasan dinding dan atap bagian luar fasilitas iradiator gamma BATAN 500K sebagai fungsi tebal beton.

| Beton dengan rapat massa 2,35 g/cm ³ | | | | Beton dengan rapat massa 2,45 g/cm ³ | | | |
|---|--|---------------|---------------|---|--|---------------|---------------|
| Tebal, cm | Laju dosis maks. permukaan dinding sisi luar, mrem/jam | | | Tebal, cm | Laju dosis maks. permukaan dinding sisi luar, mrem/jam | | |
| <i>d</i> | \dot{D}_x | \dot{D}_y | \dot{D}_z | <i>d</i> | \dot{D}_x | \dot{D}_y | \dot{D}_z |
| 120 | 6,703 | 92,6 | 436,1 | 120 | 3,706 | 54,40 | 233,7 |
| 125 | 3,687 | 52,09 | 234,7 | 123,16 | 2,499 | ~ | ~ |
| 128,25 | 2,499 | ~ | ~ | 125 | 1,987 | 29,87 | 122,4 |
| 130 | 2,026 | 29,25 | 126,1 | 130 | 1,065 | 16,37 | 64,01 |
| 135 | 1,113 | 16,39 | 67,71 | 135 | 0,5702 | 8,952 | 33,46 |
| 140 | 0,6108 | 9,17 | 36,31 | 140 | 0,3051 | 4,887 | 17,47 |
| 145 | 0,3350 | 5,122 | 19,43 | 141,59 | 0,2499 | ~ | ~ |
| 147,44 | 0,2499 | ~ | ~ | 145 | 0,1632 | 2,664 | 9,10 |
| 150 | 0,1837 | 2,857 | 10,42 | 145,53 | ~ | 2,499 | ~ |
| 151,14 | ~ | 2,499 | ~ | 150 | 0,08722 | 1,450 | 4,751 |
| 155 | 0,1006 | 1,591 | 5,555 | 154,90 | ~ | ~ | 2,499 |
| 160 | 0,05512 | 0,8849 | 2,970 | 155 | 0,04659 | 0,7879 | 2,465 |
| 161,42 | ~ | ~ | 2,499 | 160 | 0,02488 | 0,4275 | 1,283 |
| 165 | 0,03017 | 0,4915 | 1,596 | 164,38 | ~ | 0,2499 | ~ |
| 170 | 0,01651 | 0,2727 | 0,8492 | 165 | 0,01328 | 0,2317 | 0,6711 |
| 170,74 | ~ | 0,2499 | ~ | 170 | 0,007086 | 0,1254 | 0,3476 |
| 175 | 0,009031 | 0,1511 | 0,2711 | 172,57 | ~ | ~ | 0,2499 |
| 179,80 | ~ | ~ | 0,2499 | 175 | 0,003779 | 0,06780 | 0,1820 |

| | | | | | | | |
|-----|----------|---------|--------|-----|----------|---------|--------|
| 180 | 0,004938 | 0,08364 | 0,2440 | 180 | 0,002015 | 0,03661 | 0,0948 |
|-----|----------|---------|--------|-----|----------|---------|--------|

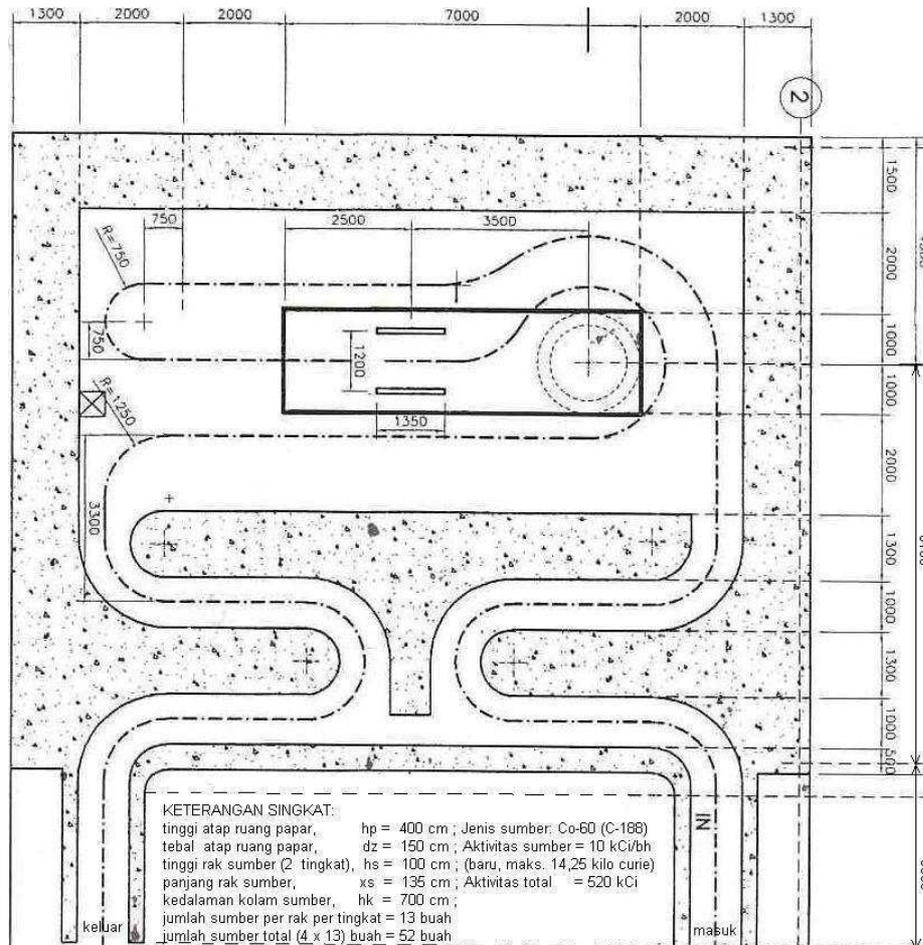
Tabel 2. Parameter desain dasar ruang / bangunan ruang papir irradiator- γ BATAN 500K.

| Program yang digunakan | MCNP5 | PensilBaris1.2 | PensilBaris1.2 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| Bentuk ruang papir | Kotak | Kotak | Kotak |
| Panjang ruang bagian dalam, X_r | 13,00 meter | 13,00 meter | 13,00 meter |
| Lebar ruang bagian dalam, Y_r | 6,00 meter | 6,00 meter | 6,00 meter |
| Tinggi ruang bagian dalam, Z_r | 4,00 meter | 4,00 meter | 4,00 meter |
| Panjang rak horisontal sumber, X_s | 135,0 cm | 135,0 cm | 135,0 cm |
| Jarak antar pensil sumber, d_s | 11,25 cm | 11,25 cm | 11,25 cm |
| Jarak antar rak sumber, Y_s | 120,0 cm | 120,0 cm | 120,0 cm |
| Rapat massa beton (ρ_{beton}) | 2,45 g/cm ³ | 2,45 g/cm ³ | 2,35 g/cm ³ |
| Tebal minimum dinding beton arah sb-x, untuk $\dot{D}_x \leq 0,25$ mrem/jam | 145 cm | 141,6 cm | 147,4 cm |
| Tebal minimum dinding beton arah sb-y, untuk $\dot{D}_y \leq 0,25$ mrem/jam | 155 cm | 164,4 cm | 170,7 cm |
| Tebal minimum atap beton arah sb-z, untuk $\dot{D}_z \leq 2,50$ mrem/jam (pilihan 1) | 140 cm | 154,9 cm | 161,4 cm |
| Tebal minimum atap beton arah sb-z, untuk $\dot{D}_z \leq 0,25$ mrem/jam (pilihan 2) | - | 172,6 cm | 179,8 cm |

Tabel 3. Parameter desain bentuk ruang / bangunan kolam irradiator- γ BATAN 500K.

| Program yang digunakan | PensilBaris1.2 | MCNP5 |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Bentuk ruang / bangunan kolam | Segi-4, $\theta = 90^\circ$ | Segi-4, $\theta = 90^\circ$ |
| Panjang dalam arah-x | 700 cm | 700 cm |
| Lebar dalam arah-y | 200 cm | 200 cm |
| Kedalaman kolam dari lantai ruang | 500 - 600 cm | 600 - 650 cm |
| Jarak bawah rak dari dasar kolam | 50 cm | 50 cm |
| Jarak muka air dari lantai ruang | 50 cm | 50 cm |
| Kedalaman benam rak dari muka air, untuk $\dot{D} \leq 2,50$ mrem/jam (pilihan 1) | 325 cm | - |
| Kedalaman benam rak dari muka air, untuk $\dot{D} \leq 0,25$ mrem/jam (pilihan 2) | 485 cm | 400 cm |

Bedasarkan hasil perhitungan diatas dibuat desain dasar ruang papir irradiator- γ dengan 1 lubang bongkar/muat sumber- γ , rak sumber yang simetris terhadap ruang papir dan kolam penyimpan sumber yang tidak perlu simetris tetapi cukup praktis dan ekonomis seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Rancangan dasar ruang papir iradiator- γ BATAN 500K.

Perlu dikemukakan di sini, bahwa berdasarkan SK dari Ka Bapeten No. 11/Ka-BAPETEN/VI-99 tentang Izin Konstruksi dan Operasi Iradiator aturan IAEA [11,12,13] disebutkan bahwa syarat khusus bahan struktur bangunan iradiator- γ adalah menggunakan adonan beton dengan rapat massa minimum $2,4 \text{ g/cm}^3$, yang mampu menerima tekanan sampai 3000 psi ($210,9 \text{ kg/cm}^2$). Apabila menggunakan tegel porselin, rapat massa bahan tegel minimum $2,3 \text{ g/cm}^3$. Jika kedua kerapatan tersebut tidak terpenuhi maka dapat dilakukan dengan menambah ketebalan dinding dengan syarat laju dosis maksimum masih dalam batas yang diizinkan.

KESIMPULAN

Telah dilakukan perhitungan fasilitas radiator gamma dengan menggunakan program PinsilBaris 1.2, dan hasilnya tidak jauh berbeda dibandingkan dengan program MCNP. Berdasarkan hasil perhitungan, telah dibuat desain dasar iradiator- γ BATAN

500K kelas ekonomi berkekuatan 0,5 MCi yang memenuhi kriteria keselamatan sesuai dengan yang dipersyaratkan BAPETEN. Dengan selesainya desain dasar ini maka dapat dilakukan desain lengkap sehingga dapat diaplikasikan untuk kepentingan masyarakat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Kementrian Riset dan Teknologi yang telah membiayai penelitian ini melalui Program Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perakayasa (PIPKPP) berdasarkan SK Menteri Riset dan Teknologi Nomor: 053/M/Kp/II/2010, tanggal: 09 Pebruari 2010.

DAFTAR PUSTAKA ACUAN

1. John R. Lamarsh. Introduction to Nuclear Engineering. 2nd Ed. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts; 1983.
2. James Wood Computational methods in reactor shielding. Pergamon Press., Headington Hill Hall, Oxford OX3 OBW, England; 1982.
3. Pudjijanto MS et all. Rancangbangun detil dan analisis laju dosis radiasi iradiator gamma sebagai pengawet bahan pangan/hasil pertanian, tahap II. Laporan Teknis PRPN-BATAN No. BATAN-RPN-L-2010-06-046; 2010.
4. Wilson A. P. Calvo, et all. A small size continuous run industrial gamma irradiator. ELSEVIER, Radiation Physics and Chemistry. 2004; 71: 561-563.
5. Nelson M. Omi, Paulo R. Rela. Gemstone dedicated gamma irradiator development. 2007 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007, Santos, SP, Brazil; September 30 to October 5, 2007.
6. Pudjijanto MS. PensilBaris Ver-1.2 – Program PC dalam Fortran-77 untuk perhitungan laju dosis radiasi dan prakiraan tebal dinding dan atap instalasi fasilitas iradiator- γ dan kedalaman benam sumber dalam kolam penyimpan sumber. 2525 rekord, 111 kb, runnable, belum dipublikasi; 2010.
7. Setiyanto, Pudjijanto MS. Ardani. Analisis laju dosis iradiator gamma menggunakan elemen bakar bekas dengan model konfigurasi sejajar. Tri Dasa Mega. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir. 2006; 8: 148 - 160
8. Monte Carlo Team. MCNP-A general Monte Carlo neutral-particle transport code. Version 5, X-5, Los Alamos National Laboratory; 2003.
9. Rogério R. RODRIGUES, at all. Gamma irradiator dose mapping: A Monte Carlo simulation and experimental measurements. 2009 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009, Rio de Janeiro,RJ, Brazil, September27 to October 2, 2009. Associação Brasileira De Energia Nuclear - ABEN, ISBN: 978-85-99141-03-8, http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/115/41115758.pdf. Accessed January 2010.
10. Ka Bapeten. Surat Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Republik Indonesia No. 11/Ka-Bapeten/VI-99, Tgl. 15 Juni 1999, tentang Izin Konstruksi dan Operasi Iradiator; 1999.

11. MDS Nordion. Sciences advencing health. The Standard. C-188 Cobalt-60, 447 March Road, Ottawa, ON K2IK 1X8, Kanada. Available from URL http://www.mds.nordion.com_documents/products/C-188_Brochure.pdf. Accessed, July 2010.
12. J. Kenneth Shultis , Richard E. Faw. Shldutil : A Code for useful shielding data. dept. of mechanical and nuclear engineering. Kansas State University, Manhattan, KS 66506; Available from URL: <http://http://ww2.mne.ksu.edu/~jks/pgms.htm>. Accessed, October 2009.
13. Kishor Mehta, Andrzej G. Chmielewski. Gamma irradiators for radiation processing. IAEA's Industrial Applications and Chemistry Section, Division of Physical and Chemical Sciences , 44 hlm., IAEA, WINA; Available from URL.: <http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/Brochgamairradd.pdf>. Accessed, October 2009.
14. J. Masefield , et all. Guidelines for industrial radiation sterilization of disposable medical products (Cobalt-60 Gamma Irradiation). IAEA-TECDOC-539, IAEA, Wina, 1990; Available from URL: http://www-pub.iaea.org/publications/PDF/te_539_web.pdf. Accessed June 2010.