

DESAIN KONSEPTUAL PERISAI BIOLOGI IRRADIATOR GAMMA Co-60

Sutomo, Petrus Z. dan Edy Karyanta
Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir (PRPN) – BATAN
E-mail : stomo@batan.go.id

ABSTRAK

DESAIN KONSEPTUAL PERISAI BIOLOGIS IRRADIATOR GAMMA Co-60. Desain Konseptual Perisai Biologi Irradiator Gamma Co-60 kapasitas 200 kCi telah dilakukan. Berdasarkan persyaratan yang ada, bahan perisai ruang irradiasi yang dipilih adalah beton normal dan ruang irradiasi didesain dengan ketentuan jarak sumber (saat sedang digunakan) terhadap dinding dan atap 3,5 m. Desain bangunan ini berbentuk kubus atau kotak dengan ukuran 7 m x10 m x4 m. Beton normal adalah beton dengan bahan baku semen portland, agregat kasar dan halus, serta air. Beton ini memiliki berat jenis berkisar 2200 – 2500kg/m³. Desain ini memilih berat jenis beton 2350kg/m³ karena pertimbangan kemudahan untuk mendapatkan bahan baku yang dapat mencapai nilai di atas agar dosis paparan lebih rendah dari 0,25 mR/Jam,sesuai SK Bapeten No.11/Ka-BAPETEN/VI-99 perisai beton dibuat menjadi tebal 1,5 m.

Kata kunci: Perisai radiasi, beton normal, irradiator gamma Co-60, berat jenis beton

ABSTRACT

A CONCEPTUAL DESIGN OF BIOLOGICAL SHIELDING FOR Co-60 GAMMA IRRADIATOR. A conceptual design of biological shielding for Co-60 gamma irradiator having capacity of 200 kCi has been performed. Based on the available requirements, the shielding material used for irradiation chamber is normal concrete and the irradiation chamber is designed such that the distance between source (when being used) and wall is 3.5 m. The structure of the building is designed in cube of 7 m × 10 m × 4 m. Normal concrete is concrete using raw material of portland cement, coarse and fine aggregate plus water. The concrete density ranges from 2200 to 2500 kg/m³. For this design, the concrete density selected is 2350 kg/m³, considering the ease of procuring the raw material needed as defined by the decree of Bapeten chairment No.11/Ka-Bapeten/VI-99, in order to make exposure doses less than 0,25 mR/hour, the concrete shielding thickness has to be 1.5 m.

Keywords: Radiation shielding, normal concrete, Co-60 gamma irradiator, concrete density

1. PENDAHULUAN

Fasilitas utama sebuah irradiator gamma terdiri dari sumber radiasi, sistem mekanik transportasi produk yang akan diirradiasi, dan perisai radiasi untuk melindungi pekerja dan lingkungan^[1]dari paparan radiasi. Sumber radiasi yang digunakan adalah Co-60. Dalam desain sebuah irradiator, sumber radiasi ini harus didesain setipis/sekecil mungkin untuk menghindari kehilangan energi akibat serapan dari dalam material sumber, dan sumber harus dikelilingi secara efektif oleh produk (target) yang akan diirradiasi, sehingga sebagian besar sinar gamma yang dipancarkan akan mengenai target. Karena itu perlu didesain bentuk geometri yang cocok antara perangkat sumber gamma dan wadah (reaktor) tempat target dan sistem transportasi target.

Mekanisme transportasi target/produk menentukan apakah dosis yang diterima efisien dan seragam pada seluruh bagian target. Distribusi dosis serap yang seragam menentukan kualitas produk hasil irradiasi dan efisiensi pemanfaatan sumber gamma. Untuk produk/target padat, ketidak seragaman dosis serap tiap produk yang diirradiasi tetap menjadi kendala, sedangkan produk cair dengan pengadukan keseragaman lebih

mudah didapat. Karena itu untuk mendapatkan produk hasil irradiasi yang maksimal (kualitas baik) perlu didesain sistem mekanisme transportasi produk secara tepat sesuai dengan produk yang akan diirradiasi.

Perisai radiasi pada irradiator berfungsi untuk melindungi pekerja dan lingkungannya dari paparan radiasi. Beberapa material berikut biasa digunakan sebagai perisai radiasi, yaitu timah hitam (Pb), beton, air dan baja. Perisai timah hitam banyak digunakan pada irradiator berukuran kecil, untuk skala litbang, dan sistem batch. Untuk irradiator skala industri menggunakan beton sebagai perisai biologi, karena lebih murah dari pada Pb, dan air sebagai perisai tempat penyimpanan sumber^[2]. Makalah ini akan mengulas tentang desain perisai irradiator gamma yang menggunakan sumber Co-60 aktifitas 200 kCi. Irradiator ini dirancang untuk memproduksi lateks karet alam prevulkanisasi radiasi.

1.1. TEORI

Energi sinar gamma dapat diserap oleh material yang dilaluinya, tapi material itu tidak menjadi radioaktif. Bila material itu sel biologi, maka sel dapat berubah karakteristiknya. Perubahan akibat radiasi ini dapat digunakan untuk kepentingan yang bermanfaat untuk kehidupan manusia seperti pengawetan dan penyempurnaan karakteristik atau bahkan merusak. Berdasarkan kenyataan tersebut, selanjutnya penggunaan sinar gamma dikendalikan dengan menggunakan material, dan atau dengan pengaturan aktifitas sumber. Akibat interaksi dengan material, intensitas gamma mengalami atenuasi, sehingga material dapat berfungsi sebagai perisai ataupun sebagai target yang akan diirradiasi. Konsep penggunaan material sebagai perisai karena daya tembus sinar gamma bergantung pada jenis materialnya. Bila suatu berkas photon/gamma dengan intensitas I_0 masuk pada suatu bidang dari material penyerap, maka pada suatu kedalaman x di dalam material tersebut, intensitasnya akan berkurang karena adanya interaksi dengan material itu, Dengan penambahan jarak dx pada x , maka terjadi pengurangan lebih lanjut dari I dengan dI . Kemungkinan interaksi di dalam dx adalah dI / I , sedangkan kemungkinan interaksi persatuan jarak adalah : $(dI/I) / (dx)$ dan kemungkinan ini disebut koefisien atenuasi linier (*linear attenuation coefficient*) dan dinyatakan dengan μ yang mempunyai dimensi cm^{-1} . Dengan demikian, pengurangan intensitas di dalam dx dapat ditulis^[3]

$$dI = \mu I dx, \dots\dots\dots (1)$$

bila syarat batas $I = I_0$ pada $x = 0$, maka penyelesaian persamaan itu adalah

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \dots\dots\dots (2)$$

dimana I_0 adalah intensitas sinar gamma sebelum masuk material, I adalah intensitas setelah melewati material, dan x tebal material. Selain itu, ada faktor *buildup* yang perlu diperhitungkan dalam menentukan nilai intensitas I yang lolos dari material. Faktor *buildup* menambah jumlah intensitas sinar gamma yang melewati material, yaitu lebih besar dari I . Penambahan ini berasal dari adanya radiasi sekunder berupa efek Compton, radiasi anihilasi dari proses produksi pasangan dan radiasi *Bremstrahlung*.

2. METODOLOGI

Desain Perisai Radiasi dari Bahan Beton.

Atenuasi sinar gamma saat menembus material bergantung pada jenis materialnya. Material dengan densitas tinggi akan memiliki nilai koefisien atenuasi linier tinggi. Kemudian material yang memiliki nomor atom tinggi memiliki kemampuan menyerap berkas radiasi gamma lebih baik. Pada desain perisai irradiator untuk kepentingan industri, selain densitas juga faktor biaya, kemudahan pembuatan/pembentukan dan ketersediaan material menjadi parameter penentu. Berdasarkan parameter di atas, material perisai biologi pada irradiator gamma dipilih beton dengan densitas tertentu, dan air sebagai perisai tempat penyimpanan sumber, saat sumber tidak sedang dipakai.

Perisai beton ini akan digunakan pada desain irradiator tipe batch, dimana target yaitu lateks diam, berada dalam tangki pada tempat tertentu. Pada keadaan sedang tidak bekerja, sumber Co-60 disimpan dalam kolam yang berada tepat di bawah tangki. Saat proses irradiasi sumber akan diangkat, didekatkan ke target lateks dalam tangki. Target berada dalam tangki selama proses irradiasi dengan waktu tertentu sesuai dengan besarnya kapasitas sumber radiasi. Irradiator ini digunakan untuk memproduksi lateks prevulkanisasi dengan sumber Co-60 kapasitas 200 kCi dan volume tangki irradiasi (reaktor) adalah 2,5 m³. Proses irradiasi didesain selama 15 – 17 jam, setelah proses irradiasi, lateks prevulkanisasi (lateks cair yang telah diirradiasi) dipompa ke tangki penampungan di luar gedung irradiator. Produk lateks prevulkanisasi ini selanjutnya dibawa ke pabrik produksi barang jadi dari lateks. Berikut penjelasan tentang desain beton sebagai perisai radiasi untuk memenuhi syarat yang sesuai dengan Lampiran II Keputusan Kepala Bapeten No. 11/Ka-Bapeten/VI-99 tentang Izin Konstruksi dan Operasi Irradiator^[4].

2.1. Material Perisai Beton Penahan Radiasi.

Beton yang digunakan pada sebuah irradiator gamma berfungsi sebagai dinding, perisai biologi terhadap radiasi gamma dan struktur penguat bangunan. Sebagai dinding yang merangkap sebagai perisai radiasi, densitas minimum beton adalah 2400 kg/m³ sesuai aturan Ka.Bapeten, dan yang harus mampu menahan beban tekan sebesar 210,9 kg/cm². Beton jenis ini masuk katagori beton normal. Beton adalah campuran antara semen, agregat kasar dan halus, air, dan zat aditif dengan komposisi tertentu. Komposisi yang berbeda-beda di antara bahan baku beton mempengaruhi sifat beton yang dihasilkan. Pembagian komposisi campuran biasanya diukur dalam satuan berat, meskipun berdasarkan volume juga bisa. Semen yang digunakan jenis *portland* yang ada dipasar, agregat halus adalah pasir dan agregat kasar adalah kerikil (densitas tinggi), semuanya bebas dari bahan pengotor yang dapat melemahkan konstruksi. Berikut beberapa persyaratan bahan baku beton penahan radiasi.

2.1.1. Semen

- 1) Semen yang digunakan adalah semen *portland* yang sesuai dengan SNI 15-2049-2004^[5]
- 2) Semen yang digunakan pada pekerjaan konstruksi harus sesuai dengan semen yang digunakan pada perancangan proporsi campuran.

2.1.2. Agregat

Ukuran maksimum nominal agregat kasar harus tidak melebihi^[6]:

- 1) 1/5 jarak terkecil antara sisi-sisi cetakan, ataupun
- 2) 1/3 ketebalan pelat lantai, ataupun
- 3) 3/4 jarak bersih minimum antara tulangan-tulangan atau kawat-kawat, bundel tulangan, atau tendon-tendon prategang atau selongsong selongsong.

Spesifikasi Agregat Untuk Beton Penahan Radiasi^[7]

Beton penahan radiasi adalah komponen struktur dari beton yang diperlukan untuk melindungi manusia dari radiasi atau penyinaran yang membahayakan. Agregat untuk beton penahan radiasi harus memenuhi ketentuan-ketentuan dalam persyaratan umum sebagai berikut:

1. Agregat untuk beton radiasi harus memenuhi persyaratan agregat untuk beton normal,
2. Penggunaan agregat sintesis boron-frit dalam campuran beton tidak lebih dari 300 kg/m³ dan tidak boleh mengandung bahan larut dalam air lebih dari 2%

Persyaratan ketahanan keausan agregat kasar harus memenuhi ketentuan yaitu;

1. Agregat kasar bila diuji dengan metode uji keausan mesin abrasi Los Angeles tidak boleh melebihi 50%.

2. Agregat kasar yang tidak memenuhi persyaratan butir 1) tersebut di atas dapat digunakan sebagai agregat beton untuk penahan radiasi, asal dapat dibuktikan bahwa beton yang dihasilkan mempunyai kekuatan yang cukup untuk memberikan kapasitas daya dukung beban aman terhadap struktur.

Agregat untuk beton penahan radiasi pengion adalah agregat berat alami dengan kandungan utama mineral hemanit, ilmenit, magnetit, dan barit serta agregat berat sintesis ferofosfor yang merupakan campuran fosfida besi. Agregat beton ini harus memenuhi persyaratan untuk beton normal dan penggunaan agregat sintesis boron-frit tidak boleh lebih dari 300 kg/m^3 .

2.1.3. Air

- 1) Air yang digunakan pada campuran beton harus bersih dan bebas dari bahan-bahan merusak seperti mengandung oli, asam, alkali, garam, bahan organik, atau bahan-bahan lainnya yang merugikan terhadap beton atau tulangan.
- 2) Air pencampur yang digunakan pada beton prategang atau pada beton yang didalamnya tertanam logam aluminium, termasuk air bebas yang terkandung dalam agregat, tidak boleh mengandung ion klorida dalam jumlah yang membahayakan. Air yang tidak dapat diminum tidak boleh digunakan pada beton, kecuali ketentuan berikut terpenuhi :
 - a. Pemilihan proporsi campuran beton harus didasarkan pada campuran beton yang menggunakan air dari sumber yang sama.
 - b. Hasil pengujian pada umur 7 dan 28 hari pada kubus uji mortar yang dibuat dari adukan dengan air yang tidak dapat diminum harus mempunyai kekuatan sekurang-kurangnya sama dengan 90% dari kekuatan benda uji yang dibuat dengan air yang dapat diminum. Perbandingan uji kekuatan tersebut harus dilakukan pada adukan serupa, terkecuali pada air pencampur, yang dibuat dan diuji sesuai dengan "Metode uji kuat tekan untuk mortar semenhidrolis (Menggunakan spesimen kubus dengan ukuran sisi 50 mm)" (ASTM C 109).

2.2. Perencanaan komposisi campuran semen, air dan agregat untuk beton normal penahan radiasi gamma.

Pembuatan campuran dan pengadukan semen, air dan agregat harus menghasilkan campuran serbarata dengan ukuran takaran bahan baku tertentu. Faktor ratio air-semen menentukan kualitas beton yang dihasilkan. Bila ratio air-semen besar kekuatan beton menurun dan sebaliknya. Desain beton untuk mendapatkan densitas beton 2400 kg/m^3 , yaitu beton normal sebagai penahan radiasi, merujuk ke SNI 03-2494-2002 (SK SNI-1993)⁷ dan SNI DT-91-0008-2007⁸. Berdasarkan Lampiran II Keputusan Ka Bapeten No.11/Ka-Bapeten/VI-99, dinding bangunan dihitung sedemikian rupa sehingga tebalnya menyebabkan laju penyinaran dibagian terluar sebesar $0,25 \text{ mR/jam}$. Hal ini umumnya dapat dipenuhi dengan beton 2400 kg/m^3 dengan kuat tekan 3000 psi ($20,7 \text{ MPa}$). Dengan menggunakan nilai $20,7 \text{ MPa}$ dan disesuaikan dengan tabel perbandingan komposisi (dalam kg) semen, agregat (kerikil dan pasir), dan air untuk membuat 1 m^3 beton normal berdasarkan SNI DT-91-0008-2007, dipilih nilai mutu beton yang digunakan untuk desain beton penahan radiasi adalah $21,7 \text{ MPa}$ (K 250). Sehingga didapat komposisi berat semen (portland) adalah 384 kg , pasir = 692 kg , kerikil = 1039 kg , air = 215 kg dengan faktor ratio air – semen = $0,56$, dengan ketelitian 5 kg . Dengan komposisi ini akan menghasilkan beton dengan densitas minimal 2350 kg/m^3 dengan mutu beton K250. Beton normal adalah beton yang mempunyai berat jenis $2200 - 2500 \text{ kg/m}^3$ menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah serta tidak menggunakan bahan tambahan. Dalam klasifikasi beton, beton normal masuk katagori kelas II. Beton kelas II adalah untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Beton kelas II dibagi dalam mutu-mutu standar B1, K125, K175 dan K225. Meskipun nilai mutu beton yang dipilih untuk desain penahan radiasi lebih besar dari K225 yaitu K 250, tapi dapat masuk kelas II beton normal. Hal ini dibolehkan untuk pertimbangan bahwa penahan radiasi ini

berfungsi rangkap yaitu sebagai dinding irradiator penahan/perisai radiasi dan struktur penguat, dimana pada konstruksi itu menahan beban mati, beban hidup (ada crane) dan gempa. Oleh karena itu saat pengerjaannya perlu pengawasan yang ketat terhadap mutu bahan-bahan dengan keharusan untuk memeriksa kekuatan tekan beton secara kontinyu.

2.3. Desain Perisai Radiasi Beton, tebal dan geometrinya

Perencanaan perisai radiasi dalam bangunan ini akan lebih memperhatikan dari syarat aman terhadap radiasi daripada perhitungan secara struktur, sehingga ketebalan dinding dan atap akan ditentukan dengan perhitungan akibat radiasi.^[9]

Untuk hal tersebut di atas diperlukan beberapa syarat :

2.3.1. Syarat bentuk

- 1) Bentuk bangunan harus dapat menyembunyikan sumber, sehingga paparan radiasi tidak langsung lurus, harus tersekat dan berbelok-belok.
- 2) Ada labirin untuk akses masuk-keluar ruang irradiasi untuk kegiatan *maintenance*, dan lubang atap untuk proses *loading unloading* penggantian sumber lama dan baru .
- 3) Bentuk bangunan irradiator adalah kotak/kubus, lihat Gambar 1 dan Gambar 2 pada lampiran.

2.3.2. Syarat aman

- 1) Bangunan dibuat dengan dinding dan atap dengan ketebalan berdasar pertimbangan keselamatan radiasi dari bahan beton, timah dsb.
- 2) Di luar dinding harus memenuhi syarat aman untuk orang yang bukan pekerja radiasi dengan laju penyinaran tidak lebih dari 0,25 mR/jam (2,5 μSv/Jam)^[4].
- 3) Untuk bangunan irradiator gamma digunakan material beton bertulang dengan ρ = 2350kg/m³.

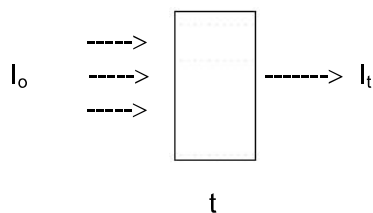
Perhitungan ketebalan perisai radiasi^[3]

$$\text{Rumus : } I_t = I_o \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \dots\dots\dots(3)$$

Dimana : I_t = laju penyinaran yang lolos
 I_o = laju penyinaran x satuan dari sumber S
 n = Banyaknya HVL
 t = tebal bahan

Rumus Tebal perisai :

$$t = n \times \text{HVL} \dots\dots\dots(4)$$



dalam perhitungan ini,
 $I_t = 2,5 \mu\text{Sv/Jam}$
 $\mu = 0,078 \text{ cm}^{-1}$ untuk beton normal $\rho = 2350\text{kg/m}^3$

$I_0 = 500 \text{ kCi} = 18,5 \cdot 10^9 \text{ MBq}$, dan jarak sumber ke perisai (x) diasumsikan 2 m HVL sinar gamma untuk beton = 60,5 mm^[10]
Energi gamma 1,17 Mev dan 1,33 Mev

$$I_0 = \frac{A \cdot \sum E_x}{6 \cdot x^2}$$

$$I_0 = \frac{A \cdot \sum E_x}{6 \cdot x^2} = \frac{18,5 \cdot 10^9 \text{ MBq} \cdot (1,17 + 1,33)}{6 \cdot 2^2} =$$

$$1927083,332 \mu\text{Sv/jam}$$

$$\text{Log} \frac{I_0}{I_t} = \log \frac{1927083,332}{2,5} = 6,886960487$$

$$\text{Log} 2 = 0,301029995$$

$$n = \frac{6,886960487}{0,301029995} = 22,9565$$

$$t = n \times \text{HVL} = 22,9565 \times \text{HVL}$$

$$t = 22,9565 \times 60,5 \text{ mm}$$

$$t = 1400 \text{ mm} \text{ ----- } t = 1,5 \text{ m}$$

Jadi, tebal dinding/perisai ditentukan 1,5 m.

Perhitungan di atas menggunakan aktivitas sumber 2,5 x 200 kCi untuk faktor keamanan operasional, mengingat irradiator ini akan ditempatkan di dekat perkebunan karet, sehingga kemungkinan ruang irradiator dijadikan tempat penyimpanan sementara sumber – sumber bekas baik di dalam kolam maupun di atas kolam, Selain itu untukantisipasi peningkatan kapasitas dosis serap yang dibutuhkan untuk keperluan lain.

Untuk perhitungan lebih teliti, pertimbangan perhitungan perisai radiasi dapat dilakukan dengan program MCNP yang mempertimbangkan :

- Jarak sumber dengan dinding/atap
- Hamburan dan pantulan radiasi
- Bahan pembungkus sumber
- Media dari sumber sampai dinding dan atap (air, udara)

2.3.3. Syarat kokoh/kuat

Suatu bangunan harus kuat berdiri tegak dan dapat menahan gaya-gaya dari luar maupun dari dalam yaitu gaya beban berat sendiri, gaya beban peralatan dan gaya gempa. Agar bangunan dapat berdiri kokoh harus secara khusus dilakukan perhitungan pondasi, harus benar dalam asumsi dan cermat dalam melakukan perhitungan.

Dalam melakukan perhitungan struktur menggunakan rumus/formula yang baku dan menggunakan standar/code yang relevan, menggunakan asumsi-asumsi yang jelas. Menggunakan parameter yang sudah jelas, misal rangka poison, modulus young, koefisien tarik/tekan, tekanan angin, tegangan permukaan tanah, daya dukung ijin, penurunan/settlement tanah.

Perhitungan struktur harus memuat kriteria desain, persyaratan beban-beban utama, kombinasi beban beban kritis dan faktor kritis.

Stabilitas struktur yaitu kestabilan lateral dan longitudinal melalui kekakuan angka masukan, rangka terkekang, kombinasi antara kekakuan dan rangka terkukung dan sambungan pada konstruksi baja.

Perhitungan struktur mengacu pada,
-Beban berat g (t/m^2)
-Beban berat penahan P (ton)
-Beban gempa dengan percepatan gempa
 $a = g$ (percepatan gravitasi)

Dari beban seperti di atas akan menimbulkan momen pada tiap tinjauan. Misal pada atap, dinding dan fondasi. Harga momen dapat untuk menentukan dimensi bangunan dan kekuatan struktur. Formula-formula yang biasa dipakai untuk menghitung struktur beton mengacu pada ACI (American Concrete Institute)⁶⁾, Peraturan Beton Bertulang Indonesia 71⁹⁾, SNI 1726-2002¹¹⁾, sedangkan konstruksi baja mengacu pada ASME dan ASTM

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari desain konseptual perisai radiasi ini adalah sebagai berikut. Bahan perisai radiasi adalah beton normal dengan densitas $2350 \text{ kg} / \text{m}^3$, densitas ini lebih kecil dari yang ditetapkan oleh Bapeten yaitu $2400 \text{ kg} / \text{m}^3$. Konsekuensi dari perbedaan ini adalah tebal beton perisai radiasi harus lebih tebal dari ketentuan Bapeten, sehingga paparan radiasi yang lolos dari perisai tetap dalam batas aman sesuai aturan Bapeten ($0,25 \text{ mR/jam}$). Alasan menentukan densitas beton sebesar $2350 \text{ kg} / \text{m}^3$ adalah ditinjau dari faktor kemudahan untuk mendapatkan bahan baku beton, karena fakta di lapangan sangat sulit untuk mendapatkan bahan baku beton untuk mencapai densitas sebesar $2400 \text{ kg} / \text{m}^3$. Bahan baku beton normal adalah semen *portland* jenis yang ada di pasar, agregat kasar dan halus adalah batu krikil dan pasir, serta air. Semua bahan baku tersebut harus bersih, karena itu pada pelaksanaan pembuatan beton, perlu pengawasan ketat atas kualitas bahan baku. Komposisi bahan baku/ perbandingan komposisi (dalam kg) semen, agregat (krikil dan pasir), dan air untuk membuat 1 m^3 beton normal berdasarkan SNI DT-91-0008-2007⁸⁾, dipilih nilai mutu beton yang digunakan untuk desain beton penahan radiasi adalah $21,7 \text{ MPa}$ (K 250), sehingga didapat komposisi berat semen (*portland*) adalah 384 kg , pasir = 692 kg , kerikil = 1039 kg , air = 215 kg dengan faktor ratio air – semen = $0,56$, dengan ketelitian 5 kg . Dengan komposisi ini akan menghasilkan beton dengan densitas minimal $2350 \text{ kg} / \text{m}^3$ dengan mutu beton K250. Beton normal adalah beton yang mempunyai berat jenis $2200 - 2500 \text{ kg} / \text{m}^3$ menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah serta tidak menggunakan bahan tambahan. Dengan densitas beton $2350 \text{ kg} / \text{m}^3$ dan komposisi bahan baku per m^3 beton normal seperti di atas didapat tebal perisai radiasi sebesar $1,5 \text{ m}$. Geometri bangunan berbentuk kubus/kotak, dengan tebal dinding dan atap sama. Perhitungan struktur gedung irradiator lebih menitik beratkan pada faktor keselamatan radiasi, artinya dengan densitas beton normal dan komposisi bahan baku seperti di atas untuk dimensi struktur sudah terpenuhi, sedangkan kekuatan struktur akan dihitung lebih lanjut dalam desain rinci.

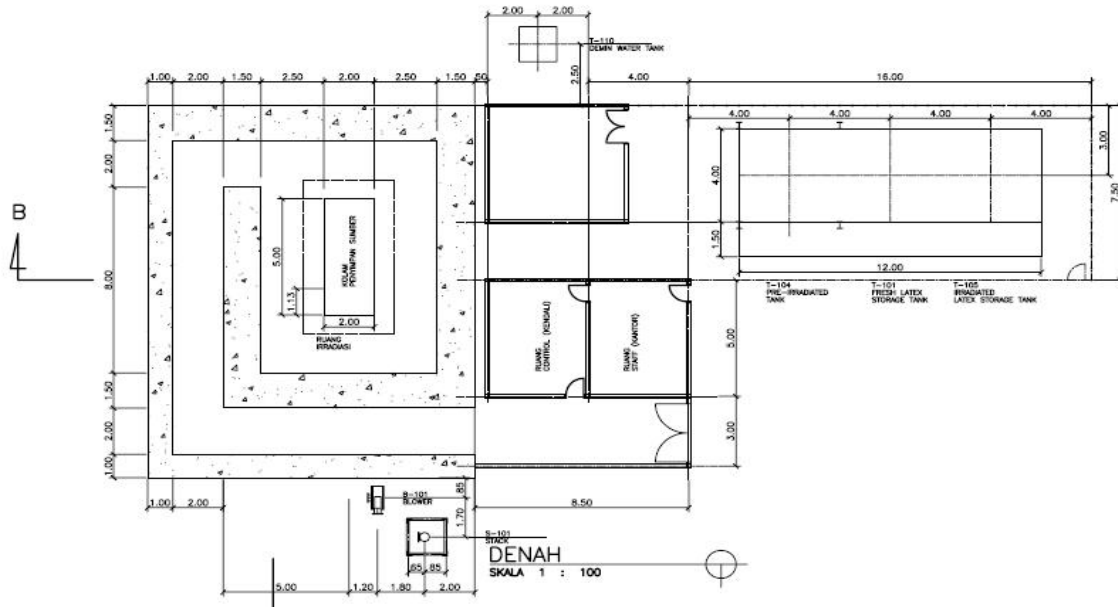
4. KESIMPULAN

Material perisai radiasi untuk irradiator dengan sumber Co-60 200 kCi adalah beton normal dengan densitas $2350 \text{ kg} / \text{m}^3$. Bahan baku beton normal ini adalah semen portland yang ada di pasar, agregat kasar dan halus adalah kerikil dan pasir, dan air, tidak ada bahan tambahan lain. Dengan komposisi untuk membuat 1 m^3 beton normal sbb : berat semen (portland) adalah 384 kg , pasir = 692 kg , kerikil = 1039 kg , air = 215 kg dengan faktor ratio air – semen = $0,56$, dengan ketelitian 5 kg . Tebal beton/perisai radiasi adalah $1,5 \text{ m}$, untuk dinding maupun atap. Bangunan ruang irradiansi berbentuk kotak atau kubus dengan ukuran dalam $7 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 4 \text{ m}$.

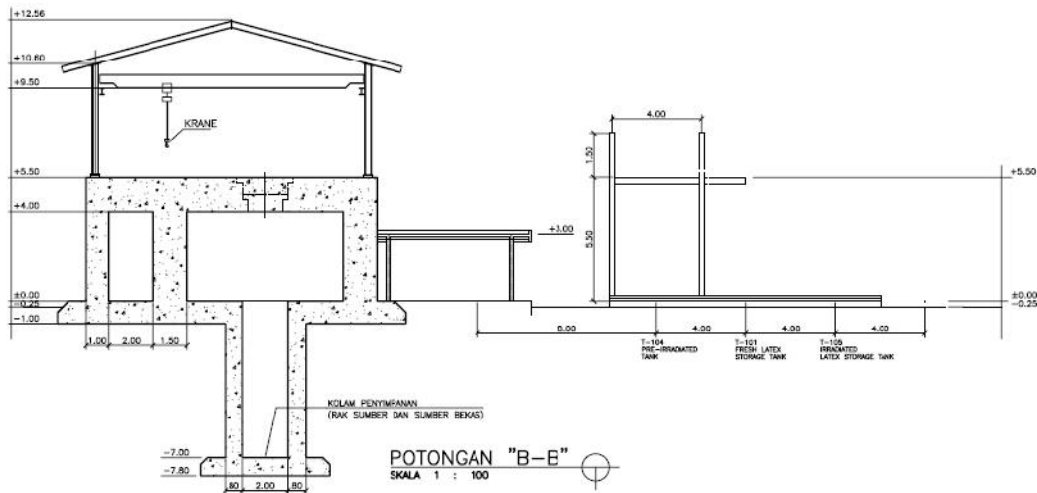
5. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. SUNAGA, HIROMI, Design of irradiation facilities and safety evaluation, Takasaki Radiation Chemistry Research establishment, JAERI, Japan, 2000.
- [2]. AGGARVALKS., MURALIDHARANP., Gamma Irradiator Design Concept for RVNRL, Bhabha Atomic Research Centre, Bombay, India, 1990.
- [3]. HERMAN CEMBER, THOMASE. JOHNSON, Introduction to Health Physics 4th ed. McGrawHill, Colorado, State University Fort Collins, Colorado, 2009.
- [4]. [Lampiran II Keputusan Kepala Bapeten No. 11/Ka-Bapeten/VI-99 tentang Izin Konstruksi dan Operasi Irradiator, 1999.
- [5]. SNI 15-2049-2004, Semen Portland, Badan Standarisasi Nasional, 2004.
- [6]. ACI 318-83, Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, November 1983.
- [7]. SNI-03-2494-2002, Spesifikasi Agregat untuk Beton Penahan Radiasi, Badan Standarisasi Nasional, Desember 2001.
- [8]. SNI-DT-91-0008-2007, Tata Cara Perhitungan Harga Satuan Pekerjaan Beton, 2007.
- [9]. Peraturan Beton Bertulang Indonesia, N1-2, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Juli 1977.
- [10]. <http://www.ndt.ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/HalfValueLayer.htm>, diunduh pada 14 nov. 2011.
- [11]. SNI 1726-2002, Standard Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung, Pusat Penelitian Pengembangan Teknologi Permukiman, April 2002.

LAMPIRAN



Gambar 1. Tampak atas ruang irradiator, tebal dinding dan labirin



Gambar 2. Tampak potongan "B-B" ruang irradiator, tebal dinding/atap dan labirin