

DESAIN BANGUNAN UTAMA IRADIATOR GAMMA KAPASITAS 200 kCi UNTUK IRADIASI BAHAN PANGAN

Sutomo
Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir-BATAN,

ABSTRAK

DESAIN BANGUNAN UTAMA IRADIATOR GAMMA 200 KCI UNTUK IRADIASI BAHAN PANGAN. Telah dilakukan desain bangunan utama iradiator gamma kapasitas 200 kCi yang berfungsi sebagai perisai radiasi sekaligus sebagai struktur bangunan. Berdasarkan persyaratan bahan perisai iradiasi, maka bahan perisai yang dipilih adalah beton normal. Beton normal adalah beton dengan bahan baku semen portland, agregat kasar dan halus, serta air. Beton ini memiliki berat jenis berkisar 2400 kg/m^3 , sesuai SK Bapeten No.11/Ka-BAPETEN/VI-99. Dari hasil perhitungan, disimpulkan bahwa tebal beton minimum adalah 1,4 m untuk mendapatkan laju dosis di luar beton 0,25 mR/jam sesuai persyaratan BAPETEN. Desain bangunan ini berbentuk kotak dengan ukuran 12 m x 16 m x 5,5 m.

Kata kunci: Desain, iradiator, bangunan, beton, perisai radiasi

ABSTRACT

THE DESIGN OF THE PRINCIPLE BUILDING IN 200 KCI GAMMA IRRADIATOR FOR FOOD IRRADIATION. The design of the principle building in 200 kCi gamma irradiator has been performed. The principal building serves as shielding and as civil structure. Based on the shielding material requirements, a normal concrete is decided as the shielding material. The normal concrete is a concrete using raw materials of portland cement, coarse aggregate, fine aggregate, and water. The concrete density ranges about 2400 kg/m^3 corresponding to the SK No.11/Ka-Bapeten/VI-99. From calculation results, it is concluded that the minimum concrete thickness is 1.4 m in order to obtain the exposure dose less than 0,25 mR/hour at outside of the building corresponding to the BAPETEN requirement. The structure of the building is designed in a box shape of 12 m x 16 m x 5,5 m.

Keywords: Design, irradiator, building, concrete, radiation shielding

1. PENDAHULUAN

Fasilitas utama sebuah iradiator gamma terdiri dari sumber radiasi, sistem mekanik transportasi produk yang akan diirradiasi berupa konveyor gantung, perisai radiasi untuk melindungi pekerja dan lingkungan dari paparan radiasi yang berupa bangunan berbahan beton dan kolam air, sistem instrumentasi dan sistem catu daya^[1]. Sumber radiasi yang digunakan adalah Co-60, yang ditempatkan pada rak sumber. Sumber nantinya akan dikelilingi oleh produk (target) yang akan diirradiasi, sehingga sebagian besar sinar gamma yang dipancarkan akan mengenai target. Karena itu perlu didesain bentuk geometri antara perangkat sumber gamma dan wadah (rak sumber), tempat target (*carrier*) dan sistem transportasi target yang sesuai.

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, ketidakseragaman 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*. Irradiator skala industri biasanya menggunakan beton sebagai perisai biologi karena lebih murah dari pada Pb, dan air sebagai perisai tempat penyimpanan sumber^[2].

Makalah ini akan membahas pada evaluasi terkait desain bangunan utama khusus struktur sipilnya saja. Sedangkan desain untuk bagian mekanik, bagian kelistrikan, bagian instrumentasi dan bagian keselamatan termasuk sumber tidak dibahas di dalam makalah ini.

2. DASAR TEORI

Prinsip kerja irradiator bahan pangan ini adalah mengirradiasi bahan pangan dengan sinar gamma yang dipancarkan oleh material radioaktif. Dengan dosis tertentu, iradiasi tersebut dapat mensterilkan bahan pangan dari bakteri, jamur dan jasad renik lain tanpa merusak bahan tersebut sehingga bahan tersebut tahan lama, tidak mudah rusak atau busuk. 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 jika tidak dikendalikan dapat 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. Daya tembus sinar gamma bergantung pada jenis materialnya.

Bila suatu berkas photon/gamma dengan intensitas I_0 masuk pada suatu bidang dari material, maka pada suatu kedalaman x di dalam material tersebut, intensitasnya akan berkurang. Dengan penambahan jarak dx pada x , maka terjadi pengurangan lebih lanjut dari intensitas I dengan dI . Bahan yang dilewati mempunyai koefisien atenuasi linier (*linear attenuation coefficient*) yang dinyatakan μ dengan satuan cm^{-1} . Pengurangan intensitas di dalam dx dapat ditulis^[3] sebagai berikut:

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

Penyelesaian persamaan itu adalah

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

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*.

Perhitungan ketebalan perisai radiasi dapat menggunakan Persamaan 3 dan 4 berikut^[4]:

$$I = I_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \dots\dots\dots(3)$$

$$t = n \times HVL \dots\dots\dots(4)$$

dengan n adalah banyaknya nilai HVL (*half-value layer*) dan t adalah tebal bahan. Nilai HVL bergantung pada bahan penahan radiasi. Perhitungan intensitas awal radiasi diberikan oleh persamaan berikut:

$$I_0 = \frac{A \cdot \sum E_\gamma}{6 \cdot x^2} \dots\dots\dots(5)$$

dengan A adalah aktivitas bahan radioaktif, E_γ adalah energi gamma dan x adalah jarak sumber ke perisai.

3. DESAIN DAN PERHITUNGAN

3.1 Persyaratan Bahan Baku Beton Penahan Radiasi

Beton yang digunakan pada sebuah irradiator gamma berfungsi sebagai dinding bangunan, perisai biologi terhadap radiasi gamma, dan struktur penguat bangunan. Sebagai dinding yang merangkap sebagai perisai radiasi, densitas minimum beton adalah 2400 kg/m^3 sesuai aturan Ka. Bapeten^[6], dan yang harus mampu menahan beban tekan sebesar $210,9 \text{ kg/cm}^2$. Beton jenis ini masuk kategori 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 di pasaran. Agregat halus adalah pasir dan agregat kasar adalah kerikil (koral), semuanya bebas dari bahan pengotor yang dapat melemahkan konstruksi. Berikut beberapa persyaratan bahan baku beton penahan radiasi.

3.1.1 Semen

- 1) Semen yang digunakan adalah semen *portland* yang sesuai dengan SNI 15-2049-2004^[6].
- 2) Semen yang digunakan pada pekerjaan konstruksi harus sesuai dengan semen yang digunakan pada perancangan proporsi campuran.

3.1.2 Agregat

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 dan persyaratan agregat untuk beton normal. Penggunaan agregat sintetis boron-ferit dalam campuran beton tidak lebih dari 300 kg/m^3 dan tidak boleh mengandung bahan larut dalam air lebih dari 2%.

Ukuran maksimum nominal agregat kasar harus tidak melebihi dari 1/5 jarak terkecil antara sisi-sisi cetakan, ataupun 1/3 ketebalan pelat lantai, ataupun 3/4 jarak bersih minimum antara tulangan-tulangan atau kawat-kawat, bundel tulangan, atau tendon-tendon prategang atau selongsong-selongsong^[7]. Agregat halus untuk beton dapat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan hasil pemecah batu. Agregat halus harus terdiri dari butir-butir yang keras dan tajam. Pasir laut tidak boleh dipakai sebagai agregat halus.

Persyaratan ketahanan keausan agregat kasar harus memenuhi ketentuan yaitu^[8];

- agregat kasar bila diuji dengan metode uji keausan mesin abrasi Los Angeles tidak boleh melebihi 50%.
- agregat kasar yang tidak memenuhi persyaratan 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.

3.1.3 Persyaratan air

- 1). Air yang digunakan pada campuran beton harus bersih dan bebas dari bahan merusak seperti mengandung oli, asam, alkali, garam, bahan organik, atau bahan lainnya yang merugikan terhadap beton atau tulangan.
- 2). Air pencampur yang digunakan pada beton prategang atau pada beton yang di dalamnya tertanam logam aluminium, termasuk air bebas yang terkandung dalam agregat, tidak boleh mengandung ion klorida dalam jumlah yang membahayakan.
- 3). 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 semen hidrolis* (menggunakan spesimen kubus dengan ukuran sisi 50 mm)^[9].

3.2 Perencanaan komposisi beton normal penahan radiasi gamma

Pembuatan campuran dan pengadukan semen, air dan agregat harus menghasilkan campuran serba rata dengan ukuran takaran bahan baku tertentu. Faktor rasio air-semen menentukan kualitas beton yang dihasilkan. Bila rasio air-semen besar, kekuatan beton menurun dan sebaliknya. Desain beton untuk mendapatkan densitas 2400 kg/m³ sebagai penahan radiasi merujuk ke SNI 03-2494-2002 (SK SNI-1993)^[8] dan SNI DT-91-0008-2007^[10]. Dengan menggunakan nilai 20,7 MPa dan disesuaikan dengan tabel perbandingan komposisi (dalam kg) semen, agregat (kerikil dan pasir), dan air untuk membuat 1 m³ beton normal berdasarkan SNI DT-91-0008-2007, maka dipilih nilai mutu beton yang digunakan untuk desain beton penahan radiasi adalah 21,7 MPa (K250). Sehingga didapat komposisi berat semen (portland) adalah 384 kg, pasir 692 kg, kerikil 1039 kg, air 215 kg dengan faktor rasio air – semen sebesar 0,56 dengan ketelitian 5 kg. Komposisi ini akan menghasilkan beton dengan densitas minimal 2400 kg/m³ dengan mutu beton K250. Beton normal adalah beton yang mempunyai berat jenis 2200 - 2500 kg/m³ 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 mutu terdiri dari pengawasan yang ketat terhadap mutu bahan-bahan dengan keharusan untuk memeriksa kekuatan tekan beton secara kontinyu.

3.3 Desain Tebal dan Geometri Perisai Radiasi Beton,

Perencanaan perisai radiasi dalam bangunan ini lebih memperhatikan syarat aman terhadap radiasi dari pada perhitungan secara struktur, sehingga ketebalan dinding dan atap akan ditentukan dengan perhitungan akibat radiasi. Untuk hal tersebut di atas diperlukan beberapa syarat sebagai berikut:

3.3.1 Syarat bentuk

- Bentuk bangunan didesain tersekat dan berbelok-belok sedemikian sehingga paparan radiasi langsung maupun hamburan tidak keluar dari kungkungan di dalam gedung.
- Akses labirin untuk masuk-keluar ruang iradiasi disediakan untuk kegiatan *maintenance*.
- Akses untuk proses *loading unloading* penggantian sumber lama dan baru disediakan melalui lubang atap beton yang dapat dibuka-tutup.
- Bentuk bangunan utama irradiator ditunjukkan dalam Lampiran 1 dan 2.

3.3.2 Perhitungan Tebal Dinding

- Bangunan dibuat dengan dinding dan atap dengan ketebalan berdasar pertimbangan keselamatan radiasi dari bahan beton.
- Di luar dinding harus memenuhi syarat aman untuk orang yang bukan pekerja radiasi dengan laju penyinaran tidak lebih dari 0,25 mR/jam ($2,5 \mu\text{Sv/Jam}$)^[5].
- Untuk bangunan irradiator gamma digunakan material beton bertulang dengan densitas ρ sebesar 2400 kg/m^3 ^[5].
- Perhitungan ketebalan perisai radiasi menggunakan Persamaan 3, 4 dan 5 dengan nilai-nilai sebagai berikut:

$$I = 2,5 \mu\text{Sv/Jam}$$

$$\mu = 0,078 \text{ cm}^{-1} \text{ untuk beton normal dengan } \rho = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$x = 2 \text{ m (jarak sumber ke perisai)}$$

$$A = 500 \text{ kCi} = 18,5 \cdot 10^9 \text{ MBq}$$

$$\text{HVL sinar gamma untuk beton} = 60,5 \text{ mm}$$

$$E_\gamma \text{ (energi gamma) yang dipertimbangkan adalah } 1,17 \text{ Mev dan } 1,33 \text{ Mev.}$$

Dengan memasukkan nilai-nilai di atas pada Persamaan 3, 4 dan 5, diperoleh sebagai berikut:

$$I_0 = \frac{A \cdot \sum E_\gamma}{6 \cdot x^2} = \frac{18,5 \cdot 10^9 \text{ MBq} \cdot (1,17 + 1,33)}{6 \cdot 2^2} = 1927083,332 \mu\text{Sv / jam}$$

$$n = 22,9565$$

$$t = 1400 \text{ mm}$$

Dengan demikian tebal dinding/perisai minimum adalah 1,4 m. 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/atap.

Dengan mempertimbangkan dimensi liner kolam air, ruang untuk iradiasi, ketebalan dinding minimum dan akses labirin, bentuk luar bangunan utama gedung iradiasi didesain dalam bentuk kotak dengan ukuran $12 \times 16 \times 5,5 \text{ m}^3$.

3.3.3 Perhitungan Kekuatan Bangunan

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, perhitungan pondasi dilakukan

dengan mengambil asumsi-asumsi dan parameter yang tepat seperti misalnya angka Poisson, modulus Young, koefisien tarik/tekan, tekanan angin, tegangan permukaan tanah, daya dukung ijin, dan penurunan/*settlement* tanah. Perhitungan struktur menggunakan rumus/formula yang baku dan menggunakan standar/code yang relevan. Perhitungan struktur tersebut memuat kriteria desain, persyaratan beban-beban utama, kombinasi beban beban kritis dan faktor kritis. Stabilitas struktur meliputi kestabilan lateral dan longitudinal melalui kekakuan angka masukan, rangka terkekang, kombinasi antara kekakuan dan rangka terkukung dan sambungan pada konstruksi baja.

Perhitungan struktur bangunan utama tidak ditampilkan disini karena perhitungannya memerlukan pertimbangan-pertimbangan lain dan diskusi yang panjang. Dalam makalah ini hanya disampaikan ringkasan perhitungan struktur. Perhitungan struktur telah mempertimbangkan beban-beban sebagai berikut:

- beban berat sendiri (t/m^2)
- beban berat pembebanan terpusat (ton)
- beban gempa dengan percepatan gempa $a = 0,2 g$ (percepatan gravitasi)
- beban tanah aktif

Beban-beban tersebut menimbulkan momen pada tiap bagian seperti misalnya pada atap, dinding dan fondasi. Harga momen digunakan untuk menentukan dimensi bangunan dan mengevaluasi kekuatan struktur. Formula-formula yang dipakai untuk menghitung struktur beton mengacu pada ACI (*American Concrete Institute*)^[7], dan Peraturan Beton Bertulang Indonesia 71, SNI 1726-2002^[11].

5. KESIMPULAN

Material perisai radiasi adalah beton normal dengan densitas 2400 kg/m^3 . Bahan baku beton normal ini adalah semen portland yang ada di pasaran, agregat kasar dan halus berupa kerikil dan pasir serta air. Komposisi untuk membuat 1 m^3 beton tersebut adalah 384 kg semen (*portland*), 692 kg pasir, 1039 kg kerikil dan 215 kg air dengan faktor rasio air dibanding semen 0,56 dan dengan ketelitian 5 kg. Tebal beton/perisai radiasi minimum adalah 1,4 m, untuk dinding maupun atap. Bangunan ruang iradiasi berbentuk kotak dengan ukuran bangunan 12 m x 16 m x 5,5 m.

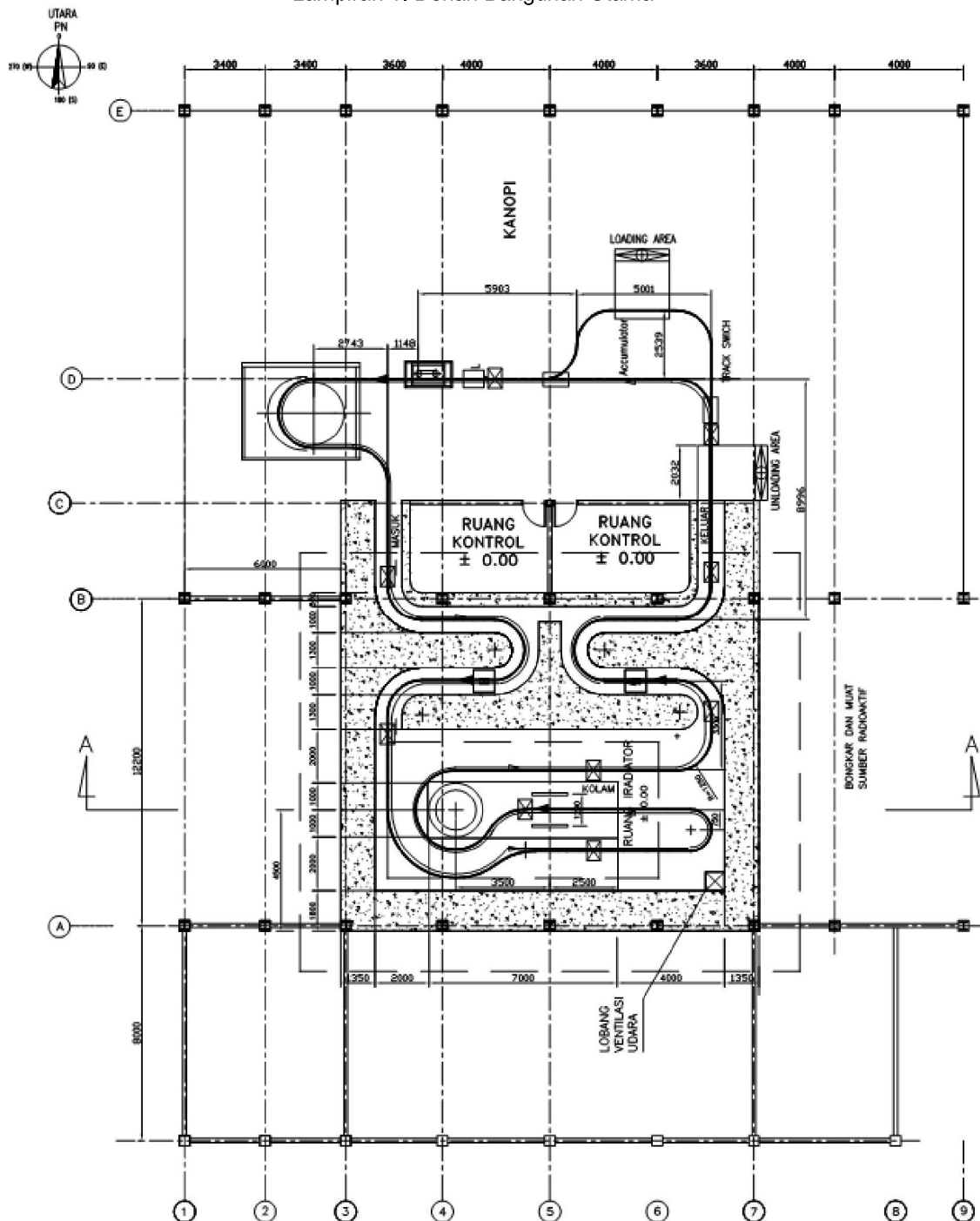
6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. SUNAGA, HIROMI, *Design Of Irradiation Facilities And Safety Evaluation*, Takasaki Radiation Chemistry Research establishment, JAERI, Japan
- [2]. AGGARVALKS., MURALIDHARAN P, 1990, *Gamma Irradiator Design Concept for RVNRL*, Bhabha Atomic Research Centre, Bombay, India.
- [3]. HERMAN CEMBER, THOMAS E. JOHNSON, 2009, *Introduction to Health Physics 4th ed*, McGraw Hill, Colorado, State University Fort Collins, Colorado.
- [4]. Anonim, diunduh pada 14 November 2011, <http://www.ndt.ed.org>.
- [5]. Anonim, 1999, *Izin Konstruksi dan Operasi Irradiator*, Lampiran II Keputusan Kepala Bapeten No. 11/Ka-Bapeten/VI-99.
- [6]. Anonim, *Semen Portland*, SNI 15-2049-2004, 2004, Badan Standarisasi Nasional.
- [7]. Anonim, November 1983, *Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, ACI 318-83.
- [8]. Anonim, Desember 2001, *Spesifikasi Agregat untuk Beton Penahan Radiasi*, Badan Standarisasi Nasional, SNI-03-2494-2002.
- [9]. Anonim, 2012, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*, ASTM C109/C109M-12.

- [10]. Anonim, *Tata Cara Perhitungan Harga Satuan Pekerjaan Beton*, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, SNI-DT-91-0008-2007, Juli 1977.
[11]. Anonim, *Standard Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung*, SNI 1726-2002, Pusat Penelitian Pengembangan Teknologi Permukiman, April 2002.

7. LAMPIRAN

Lampiran 1. Denah Bangunan Utama



Lampiran 2a. Tampak samping (potongan "A-A")

